



**TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI**

Hájkova 6, 461 17, Liberec 1

**Fakulta mechatroniky a mezioborových inženýrských studií**

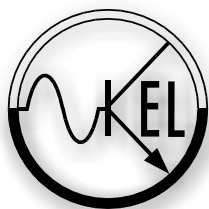
Katedra elektrotechniky

---

Diplomová práce

# **Regulační zapojení stejnosměrného motoru s cizím buzením**

Miroslav Hlaváček



Vedoucí práce: Doc. Ing. Eva Konečná, CSc.  
Konzultant: Ing. Patrik Endler

2004

---

# **TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI**

Fakulta mechatroniky a mezioborových inženýrských studií

Studijní program: M 2612 - Elektrotechnika a informatika

Obor: 3902T005 - Automatické řízení a inženýrská informatika

## **Regulační zapojení stejnosměrného motoru s cizím buzením**

Regulation connection of the DC motor separately excited

Miroslav Hlaváček

Vedoucí diplomové práce: Doc.Ing. Eva Konečná, CSc.

Konzultant: Ing. Patrik Endler

Rozsah práce: 52 stran textu

21 obrázků

20 grafů

3 tabulky

1 CD

## **Abstrakt**

Diplomová práce se zabývá rozбором činnosti stejnosměrného motoru s cizím buzením napájeného z řízeného usměrňovače SIMOREG. Měřením byly zjištěny jednotlivé parametry motoru a chování v různých provozních stavech. Práce je zaměřena na vytvoření regulačního modelu motoru pro řízení změnou napětí kotvy, s proudovou a otáčkovou zpětnou vazbou a pružnou spojkou. Pomocí simulací v programu MATLAB® Simulink™ je zjišťována stabilita v různých provozních stavech zpětnovazebního regulačního modelu. Byl proveden návrh využití multifunkční karty pro měření a řízení otáček a momentu. V závěru DP je provedeno porovnání simulace s naměřenými průběhy výstupních veličin na reálném motoru.

## **Abstract**

This diploma thesis intends to analyse running of DC engine with separate excitation with power supplied from controlled rectifier SIMOREG. Particular parameters and engine behaviour were measured in different running states. The main purpose of the thesis is to create a regulation model of an engine controlled by change of voltage of an anchor, with current and speed feedback and flexible clutch. Stability is detected by running simulation in MATLAB® Simulink™ application in different running states of feedback regulation model. I have designed a proposal to use multifunctional card for measurement and speed and moment control. Comparison of simulation and real results can be found in conclusion of this thesis.

## **Prohlášení**

Byl jsem seznámen s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Diplomovou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím diplomové práce a konzultantem.

V Liberci, dne 18.5.2004

Podpis:

Na tomto místě bych velmi rád poděkoval Doc. Ing. Evě Konečné, Csc., vedoucí diplomové práce, za cenné rady, připomínky a pečlivé vedení celé práce. Stejně tak bych rád poděkoval konzultantovi Ing. Jiřímu Kubínovi za pomoc při realizaci měření v praktické části. V neposlední řadě bych chtěl poděkování věnovat svým rodičům za jejich materiální a duševní podporu v průběhu celého studia.

Liberec, květen 2004

## Obsah

<b>1</b>	<b>Úvod.....</b>	<b>12</b>
<b>2</b>	<b>Rozbor činnosti stejnosměrného motoru s cizím buzením napájeného z řízeného usměrňovače a jeho řízení.....</b>	<b>13</b>
2.1	Seznámení s cizí buzeným stejnosměrným motorem.....	13
2.2	Princip činnosti stejnosměrného stroje.....	13
2.3	Matematický model motoru a blokové schéma.....	14
2.3.1	Vnitřní struktura bloku stejnosměrného motoru.....	18
2.4	Matematický model řízeného usměrňovače.....	19
2.4.1	Dynamický model řízeného usměrňovače.....	19
2.5	Pružná spojka.....	20
2.6	Regulace stejnosměrného motoru.....	21
2.7	Druhy regulace stejnosměrného motoru.....	22
<b>3</b>	<b>Nalezení parametrů motoru pro potřeby modelování.....</b>	<b>24</b>
3.1	Štítkové údaje motoru.....	24
3.2	Měření odporu kotvy a buzení motoru .....	24
3.3	Měření indukčnosti kotvy a buzení motoru.....	25
3.3.1	Vyhodnocení indukčnosti kotvy motoru.....	25
3.3.2	Vyhodnocení indukčnosti buzení motoru .....	27
3.4	Určení konstanty buzení.....	27
3.5	Zjištění parametru $C_{ss}$ .....	28
3.6	Měření momentu setrvačnosti.....	29
3.7	Měření charakteristiky naprázdno.....	30
3.8	Měření zatěžovací charakteristiky.....	31
<b>4</b>	<b>Modelování stejnosměrného motoru s otáčkovou a proudovou zpětnou vazbou a pružnou spojkou .....</b>	<b>33</b>
4.1	Model stejnosměrného motoru s cizím buzením s proudovou a otáčkovou zpětnou vazbou a pružnou spojkou.....	33
4.1.1	Popis jednotlivých funkčních bloků modelu.....	35
<b>5</b>	<b>Stabilita systému .....</b>	<b>37</b>
5.1	Hurwitzovo kritérium stability .....	37
5.1.1	Výpočet stability pro regulační obvod.....	38
5.2	Nyquistovo kritérium .....	41
<b>6</b>	<b>Charakteristika řízeného pohonu SIMOREG firmy Siemens.....</b>	<b>44</b>

6.1	Technické specifikace použité jednotky SIMOREG:.....	45
6.2	Změna parametrů jednotky SIMOREG.....	46
6.3	Nastavení vnitřního regulačního zapojení jednotky pro nastavení parametrů regulátoru otáček.....	49
6.3.1	Nastavení vnitřní struktury jednotky SIMOREG.....	49
6.3.2	Připojení osciloskopu.....	50
<b>7</b>	<b>Návrh využití karty Humusoft MF604 pro měření a řízení otáček a momentu.....</b>	<b>51</b>
7.1	Technické parametry měřicí karty.....	51
7.2	Podpora v Matlab® Simulink™.....	52
7.3	Experimentální měření a řízení pomocí multifunkční karty.....	54
7.3.1	Ukázka možností karty.....	54
<b>8</b>	<b>Verifikace simulačního modelu s naměřenými průběhy výstupních veličin .....</b>	<b>56</b>
8.1	Porovnání naměřených a simulovaných přechodových charakteristik.....	56
8.2	Porovnání naměřených a simulovaných průběhů při řízené zátěži.....	60
8.3	Zhodnocení dosažených výsledků.....	63
<b>9</b>	<b>Závěr.....</b>	<b>64</b>
<b>10</b>	<b>Literatura.....</b>	<b>65</b>
<b>11</b>	<b>Přílohy.....</b>	<b>66</b>
A	Výpis zdrojového textu souboru identifikace.m a crit.m.....	66
B	Naměřená data pro zatěžovací charakteristiky.....	67
C	Výpis souboru parametry.m.....	68
D	Vnitřní struktura regulačního zapojení pro určování stability.....	69

## Seznam obrázků

Obr 2.1: Elektrické schéma ss motoru s cizím buzením.....	15
Obr 2.2: Blok motoru.....	18
Obr 2.3: Vnitřní struktura motoru.....	19
Obr 2.4: Průběh řídicího napětí a střední hodnoty usměrněného napětí.....	21
Obr 2.5: Motor ve spojení s pracovním strojem.....	22
Obr 2.6: Princip regulačního obvodu.....	23
Obr 2.7: Paralelní regulace otáček a proudu.....	24
Obr 2.8: Regulace otáček s podřízenou regulací proudu.....	24
Obr 3.1: Schéma zapojení osciloskopu a generátoru k vinutí motoru.....	26
Obr 3.2: Struktura identifikace.....	27
Obr 4.1: Regulační zapojen.....	34
Obr 4.2: Model regulační struktury.....	35
Obr 4.3: Vnitřní struktura spojky.....	37
Obr 4.4: Vnitřní struktura regulátoru.....	37
Obr 5.1: Struktura regulačního obvodu.....	38
Obr 6.1: Přepínač.....	48
Obr 6.2: Zjednodušené blokové schéma vnitřního zapojení jednotky Simoreg.....	49
Obr 6.3: Blokové schéma měřícího pracoviště.....	51
Obr 7.1: Technika ovládání vstupů a výstupů.....	53
Obr 7.2: Nastavení bloku Adapter.....	54
Obr 7.3: Ovládání vstupů a výstupů multifunkční karty.....	54



## Seznam grafů

Graf 3.1: Proložení proudu exponenciální funkcí, nalezení parametru $\tau$ .....	27
Graf 3.2: Závislost $C_{ss}\Phi=f(I_b)$ získaná měřením.....	30
Graf 3.3: Naměřená doběhová křivka soustrojí.....	31
Graf 3.4: Charakteristika naprázdno.....	32
Graf 3.5: Zatěžovací charakteristiky stejnosměrného motoru.....	33
Graf 5.1: Vyšetření stability uzavřeného regulačního obvodu.....	41
Graf 5.2: Amplitudo-fázové kmitočtové charakteristiky $F_0(j\omega)$ .....	43
Graf 5.3: Logaritmicko-amplitudové a fázové charakteristiky.....	44
Graf 7.1: Vliv parabolické zátěže na ss motor.....	56
Graf 7.2: Vliv lineární řízené zátěže na ss motor.....	56
Graf 8.1: Naměřená přechodová charakteristika pro $K_p = 2.02$ a $T_i = 0.321$ .....	58
Graf 8.2: Simulovaná přechodová charakteristika pro $K_p = 2,02$ a $T_i = 0,321$ .....	58
Graf 8.3: Naměřená přechodová charakteristika pro $K_p = 4$ a $T_i = 10$ .....	59
Graf 8.4: Simulovaná přechodová charakteristika pro $K_p = 4$ a $T_i = 10$ .....	59
Graf 8.5: Naměřená přechodová charakteristika pro $K_p = 4$ a $T_i = 5$ .....	60
Graf 8.6: Simulovaná přechodová charakteristika pro $K_p = 4$ a $T_i = 5$ .....	60
Graf 8.7: Skokový průběh zátěže pro stejnosměrný motor.....	61
Graf 8.8: Naměřený požadovaný a skutečný průběh otáček.....	62
Graf 8.9: Simulovaný požadovaný a skutečný průběh otáček.....	62
Graf 8.10: Naměřený a simulovaný průběh proudu kotvy.....	63

## Seznam tabulek

Tab 3.1: Odporů na buzení a kotvě .....	25
Tab 3.2: Hodnoty parametru $C_{ss}$ .....	29
Tab 3.3: Hodnoty parametru $C_{ss}\Phi$ získané měřením.....	31

## Seznam základního použitého označení

### Značky a symboly

$B_{\text{med}}$	[T]	střední magnetická indukce
$C_{\text{ss}}\Phi$	[V.s]	konstanta buzení motoru
$C_{\text{ss}}$	[-]	konstrukční konstanta motoru
$D$	[m]	průměr hřídele
$d$	[m]	průměr rotoru
$F$	[N]	síla
$f$	[Hz]	frekvence
$F_{\text{u(s)}}$	[-]	obrazový přenos
$H_n$	[-]	Hurwitzův determinant
$i_a$	[A]	proud kotvy
$J$	[kg.m <sup>2</sup> ]	zahrnuje moment setrvačnosti
$K_a$	[Ω <sup>-1</sup> ]	konstanta zesílení obvodu kotvy motoru
$K_b$	[Ω <sup>-1</sup> ]	konstanta zesílení obvodu buzení motoru
$K_p$	[-]	proporcionální zesílení
$K_U$	[-]	statického zesílení řízeného usměrňovače
$L_a$	[H]	indukčnost vinutí kotvy
$L_b$	[H]	indukčnost vinutí buzení
$l$	[m]	délka vodiče
$l_1$	[m]	délka hřídele
$M_{\text{jm}}$	[Nm]	jmenovitý moment asynchronního motoru
$M_s$	[Nm]	moment na hřídeli ss motoru
$m_h$	[Nm]	hnací moment
$m_z$	[N.m]	zatěžovací moment
$n_n$	[ot/min]	jmenovité otáčky motoru
$p$	[-]	počet pólů statoru
$q$	[-]	počet pulzů řízeného usměrňovače
$R_{\text{(s)}}$	[-]	regulátor
$R_a$	[Ω]	odpor vinutí kotvy
$R_b$	[Ω]	odpor vinutí buzení
$r_0$	[-]	proporcionální konstanta

$r_l$	[s <sup>-1</sup> ]	integrační konstanta
$T_{AV}$	[s]	doba trvání jednoho pulzu
$T_a$	[s]	časová konstanta obvodu kotvy motoru
$T_b$	[s]	časová konstanta obvodu buzení motoru
$T_i$	[s]	časová integrační konstanta
$u_a$	[V]	napájecí napětí
$u_b$	[V]	budící napětí
$U_{d(AV)}$	[V]	střední hodnota výstupního napětí usměřovače
$u_i$	[V]	indukované napětí
$u_r$	[V]	řídící napětí usměřovače
$v$	[m.s <sup>-1</sup> ]	rychlost pohybu vodiče
$V_1$	[-]	počet vodičů rotoru
$\Delta\varphi$	[°]	úhel deformace
$\Delta t$	[s]	doba doběhu
$\Phi$	[Wb]	magnetický tok
$\tau$	[s]	časová konstanta
$\tau_p$	[m]	pólová rozteč
$\omega_{mech}$	[rad.s <sup>-1</sup> ]	úhlová rychlost hřídele
$\omega_m$	[rad.s <sup>-1</sup> ]	úhlová rychlost motoru
$\omega_p$	[rad.s <sup>-1</sup> ]	úhlová rychlost pracovního stroje

## Zkratky

A/D	analogově - digitální převodník
D/A	digitálně – analogový převodník
EEPROM	elektricky přeprogramovatelná paměť
RS-232	sériové rozhraní
IRQ	přerušení
RO	regulační obvod

# 1 Úvod

Na katedře elektrotechniky a elektromechanických systémů (KEL) Technické univerzity v Liberci jsou umístěna moderní pracoviště elektrických pohonů, která vznikla ve spolupráci s firmou Siemens. Na jednom takovémto pracovišti byla realizována tato diplomová práce. Jedná se o elektrodynamický systém složený ze stejnosměrného elektromotoru řízeného měničem napětí SIMOREG a z asynchronního elektromotoru napájeného frekvenčním měničem SIMOVERT.

Součástí pracoviště je řídicí panel, který umožňuje ovládat silové a regulační části obou pohonů a tím pádem dovoluje provádět rozličná měření pro potřeby vědeckovýzkumné činnosti katedry.

Tato práce se věnuje především stejnosměrnému motoru s jeho řídicí jednotkou SIMOREG. V první části je matematicky popsán stejnosměrný motor s cizím buzením. Pro potřeby modelování motoru a řízeného usměrňovače je zapotřebí odměřit si všechny parametry motoru, to znamená odpor vinutí kotvy, odpor vinutí buzení, konstantu motoru pro konstantní nastavení buzení, moment setrvačnosti.

Před samotným měřením jsem se musel seznámit s regulační strukturou měniče, který řídí motor. Měnič je pomocí sériové linky připojen k PC, kde pomocí softwaru Simovis nebo Drive monitor lze ovlivňovat, přes rozhraní sériové linky, jednotlivé regulační a řídicí struktury.

Jedním z cílů DP je navrhnout modelové schéma motoru pro řízení změnou napětí kotvy, s proudovou a otáčkovou zpětnou vazbou v programovém prostředí Matlab Simulink a simulovat různé provozní stavy, jako například sledovat výstupní otáčky na změně PI regulátorů ve zpětné vazbě. Následně zjišťovat stabilitu v různých provozních stavech.

V dalším bodě pomocí multifunkční karty Humusoft, bude potřeba v Simulinku – Real-Time-Toolboxu sledovat měření a řízení otáček a momentu stroje.

Simulační výsledky na modelu by se měly podobat reálnému systému, se kterým budou jednotlivé simulace porovnány.

## **2 Rozbor činnosti stejnosměrného motoru s cizím buzením napájeného z řízeného usměrňovače a jeho řízení**

### **2.1 Seznámení s cize buzeným stejnosměrným motorem**

Stejnoseměrný motor s cizím buzením se vyznačuje velmi dobrými regulačními vlastnostmi a po dlouhou dobu byl jediný, který se v regulačních pohonech vyskytoval. Hlavní důvod proč se ss motory v regulaci používají je dán především jednoduchým řízením rychlosti změnou kotevního napětí nebo budícího proudu. Výstupní otáčky přitom nejsou závislé na kmitočtu sítě.

Ve stručnosti lze uvést několik výhod cize buzeného motoru:

- jednoduché řízení rychlosti změnou kotevního napětí a budícího proudu,
- malý spouštěcí proud dosažený regulací kotevního napětí,
- lehká změna smyslu otáčení změnou polarit budícího proudu nebo kotevního napájení,
- velký rozsah otáček a výkonu.

Všeobecně je známo, že mezi největší nevýhody patří komutace a komutátor, který vyžaduje údržbu.

Stejnoseměrný motor s cizím buzením lze použít především tam kde je potřeba přesného řízení. Uplatní se od malých výkonů pohonů oken aut, ventilátorů až po složité pohony obráběcích, těžních a válcovacích strojů.

### **2.2 Princip činnosti stejnosměrného stroje**

Pro jednoduchost si lze představit rotor jako jednu smyčku vodiče procházejícího v magnetickém poli statoru. Začne-li se otáčet tímto vodičem, na kterém jsou po obou koncích kartáče dosedající na komutátor, úhlovou rychlostí  $\omega_{mech}$ , ve smyčce se indukují napětí podle indukčního zákona ( $u = Blv$ ). Komutátor působí jako mechanický usměrňovač. Výsledné napětí je dáno součtem napětí na aktivních částech obou vodičů. V rotoru stejnosměrného stroje je však celá soustava smyček, které tvoří cívky. Průběh indukovaného napětí v kotvě je jen nepatrně zvlněný. Bude-li připojen na kartáče zdroj stejnosměrného napětí, smyčkou bude protékat proud. Na vodiče smyčky bude působit

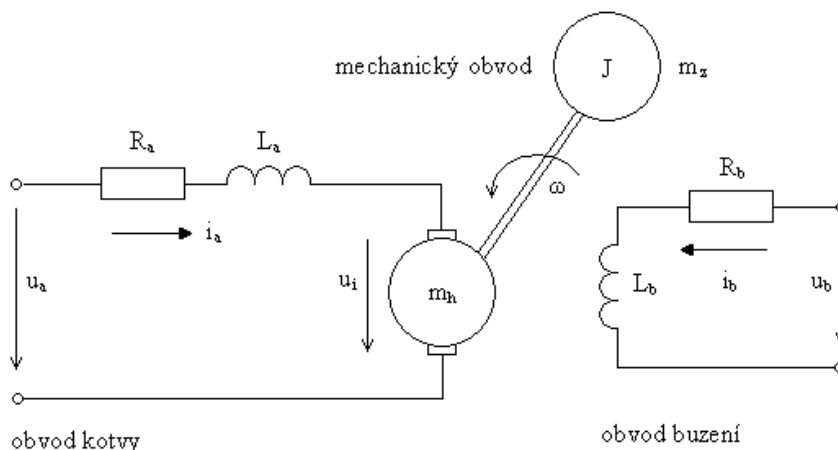
síla ( $F=Bli$ ), která způsobí, že se smyčka začne otáčet. Jakmile se smyčka pootočí o více jak  $90^\circ$ , změní smysl proudu ve vodičích, ale protože se i vodiče smyčky dostaly pod opačné póly, a magnetická indukce nezměnila smysl, zůstává smysl působící síly na vodiče stejný. Stejnosemerný stroj bude pracovat jako motor. Aby se stejnosemerný stroj nezastavil v poloze kdy se vodiče pohybují rovnoběžně s magnetickými siločarami, musí mít rotor více závitů (cívek) rovnoměrně rozložených po obvodu rotoru. Stejnosemerný stroj může snadno přejít ze stavu motorického do generátorického a naopak.

## 2.3 Matematický model motoru a blokové schéma

Matematický model, který by respektoval všechny elektromagnetické vazby, které ve stejnosemerném motoru s cizím buzením existují, by byl velmi složitý a nákladný. Identifikace požadovaných parametrů by si vyžádala velmi rozsáhlá měření. Ze zkušeností lze říci, že zvýšené náklady na tvorbu modelu nejsou v naprosté většině případů úměrné zvýšení celkové přesnosti modelu. Z tohoto důvodu se v technické praxi při tvorbě modelu motoru zanedbávají následující parametry:

- rozptylový tok budícího vinutí,
- vliv reakce kotvy,
- vzájemné transformační působení jednotlivých vinutí,
- vliv vířivých proudů v magnetickém obvodu,
- úbytek napětí na sběrném ústrojí motoru.

Elektrické schéma stejnosemerného cizí buzeného motoru je na obr.2.1.



Obr 2.1: Elektrické schéma ss motoru s cizím buzením

Schéma zobrazuje přibližné vyjádření reality, obsahuje všechny prvky, které jsou důležité z hlediska pohonu.

Uvažuje-li se lineární model, předpokladem je konstantní buzení satorového vinutí, tedy otáčky motoru lze ovlivňovat pouze velikostí napětí kotvy.

Vztah pro napětí indukované v jednom vodiči kotvy elektromotoru  $u_i$  [V] má tvar

$$u_i = B_{med} \cdot l \cdot v \quad (2.1)$$

kde proměnná  $v$  [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ] představuje rychlost pohybu vodiče v magnetickém poli statoru se střední magnetickou indukcí  $B_{med}$  [T], přičemž magnetický tok zasahuje vodič v délce  $l$  [m].

Střední magnetická indukce, která je důsledkem průchodu budícího proudu satorovým vinutím je určena jako

$$B_{med} = \frac{\Phi}{\tau_p} \cdot l \quad (2.2)$$

Veličina  $\Phi$  [Wb] tvoří magnetický tok vyvolaný průchodem budícího proudu, parametr  $\tau_p$  [m] je tzv. pólová rozteč – tedy vzdálenost mezi dvěma sousedními pólovými nástavci z nichž se skládá magnetický obvod statoru.

Rychlost pohybu vodiče  $v$  [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ] odpovídá obvodové rychlosti rotoru, kterou lze pomocí úhlové rychlosti hřídele  $\omega_{mech}$  [ $\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$ ] a poloměru rotoru  $d/2$  [m] vyjádřit vztahem (2.3). Poloměr rotoru lze odvodit z obvodu rotoru, který je roven součinu pólové rozteče a dvojnásobku počtu pólů statoru  $p$  [-].

$$v = \frac{d}{2} \omega_{mech} = \frac{p}{2\pi} \cdot \omega_{mech} = \frac{2p \cdot \tau_p}{2\pi} \cdot \omega_{mech} \quad (2.3)$$

Protože rotor má celkem  $V_l$  [-] vodičů zapojených do celkem  $2a$  [-] paralelních větví, pak celkové indukované napětí v kotvě  $u_i$  [V] lze spočítat podle

$$u_i = \frac{V_l}{2a} \cdot B_{med} \cdot l \cdot \frac{p \cdot \tau_p}{p} \cdot \omega_{mech} = C_{ss} \Phi \cdot \omega \quad (2.4)$$

Proměnná  $C_{ss} \Phi$  [V.s] se nazývá konstanta buzení motoru a její velikost je při neměnném buzení dána konstrukčním uspořádáním elektromotoru. Pro přesnější model se zavede do struktury magnetizační charakteristika motoru  $\Phi = f(i_b)$ , která má obecně nelineární závislost. Nelineární charakter magnetizační charakteristiky je dán feromagnetickými vlastnostmi materiálu, z kterých jsou vyrobeny aktivní magnetické části motoru.

Nelineární charakter magnetizační charakteristiky poněkud komplikuje modelování motoru.

Matematický model stejnosměrného cize buzeného motoru tvoří soustava rovnic, která platí pro vztahy mezi elektrickými veličinami, momenty a rychlostí stroje.

Pro uzavřený elektrický obvod kotvy platí Kirchhoffův zákon ve tvaru (2.5), který tvoří diferenciální rovnici modelu.  $L_a$  [H] představuje indukčnost vinutí kotvy, parametr  $R_a$  [ $\Omega$ ] odpovídá odporu vinutí kotvy, přičemž napájecí napětí  $u_a$  [V] způsobuje průchod proudu  $i_a$  [A] obvodem kotvy

$$u_a = R_a \cdot i_a + L_a \frac{di_a}{dt} + u_i \quad (2.5)$$

$u_i$  je napětí, které se indukuje v kotvě motoru při jeho otáčení v magnetickém poli. V obecném případě lze k regulaci použít i napájecí napětí budicího obvodu  $u_b$  [V], který popisuje následující matematický model budicího obvodu

$$u_b = R_b \cdot i_b + L_b \frac{di_b}{dt} \quad (2.6)$$

Momentovou rovnováhu na hřídeli motoru lze popsat následovně

$$m_h = V_1 \cdot F \cdot \frac{d}{2} \quad (2.7)$$

Hnací moment stroje  $m_h$  [Nm] vyvozuje celkem  $V_1$  [-] vodičů kotvy silou  $F$  [N] působící na rameni  $d/2$  [m], kde působící sílu lze vyjádřit rovnicí

$$F = l \cdot B_{med} \cdot \frac{i_a}{2a} \quad (2.8)$$

Dosazením vztahu (2.8) do rovnice (2.7) lze získat výraz

$$m_h = V_1 \cdot l \cdot B_{med} \cdot \frac{i_a}{2a} \cdot \frac{d}{2} = V_1 \cdot l \cdot B_{med} \cdot \frac{i_a}{2a} \cdot \frac{2p \cdot \tau_p}{2\pi} = C_{ss} \cdot \Phi \cdot i_a \quad (2.9)$$

Výsledná rovnice popisující rovnováhu momentů má tvar

$$J \frac{d\omega}{dt} = m_h - m_z \quad (2.10)$$

kde  $m_z$  [Nm] je zatěžovací moment vyvolaný pracovním strojem připojeným k hřídeli rotoru a pasivními odpory motoru a  $J$  [kg.m<sup>2</sup>] zahrnuje moment setrvačnosti celého pohonu.

Vzniklý model lze popsat soustavou tří diferenciálních rovnic s konstantními koeficienty v následujícím tvaru



$$T_a \frac{di_a}{dt} + i_a = K_a \cdot (i_a - u_i) \quad , \quad T_a = \frac{L_a}{R_a} \quad , \quad K_a = \frac{1}{R_a} \quad (2.11)$$

$$T_b \frac{di_b}{dt} + i_b = K_b \cdot u_b \quad , \quad T_b = \frac{L_b}{R_b} \quad , \quad K_b = \frac{1}{R_b} \quad (2.12)$$

$$J \frac{d\omega}{dt} = m_h - m_z \quad (2.13)$$

kde

$T_a$  [s]... časová konstanta obvodu kotvy motoru

$K_a$  [ $\Omega^{-1}$ ]... konstanta zesílení obvodu kotvy motoru

$T_b$  [s]... časová konstanta obvodu buzení motoru

$K_b$  [ $\Omega^{-1}$ ]... konstanta zesílení obvodu buzení motoru

Použijeme-li Laplaceovu transformaci, můžeme diferenciální rovnice (2.11),(2.12), (2.13) přepsat na algebraické rovnice. Za předpokladu nulových počátečních podmínek  $I_a(0) = 0, I_b(0) = 0, \omega(0) = 0$ .

$$T_a \cdot s \cdot I_a(s) - I_a(0) + I_a(s) = K_a \cdot [U_a(s) - U_i(s)] \quad (2.14)$$

$$T_b \cdot s \cdot I_b(s) - I_b(0) + I_b(s) = K_b \cdot U_b(s) \quad (2.15)$$

$$J \cdot s \cdot \omega(s) - \omega(0) = M_h(s) - M_z(s) \quad (2.16)$$

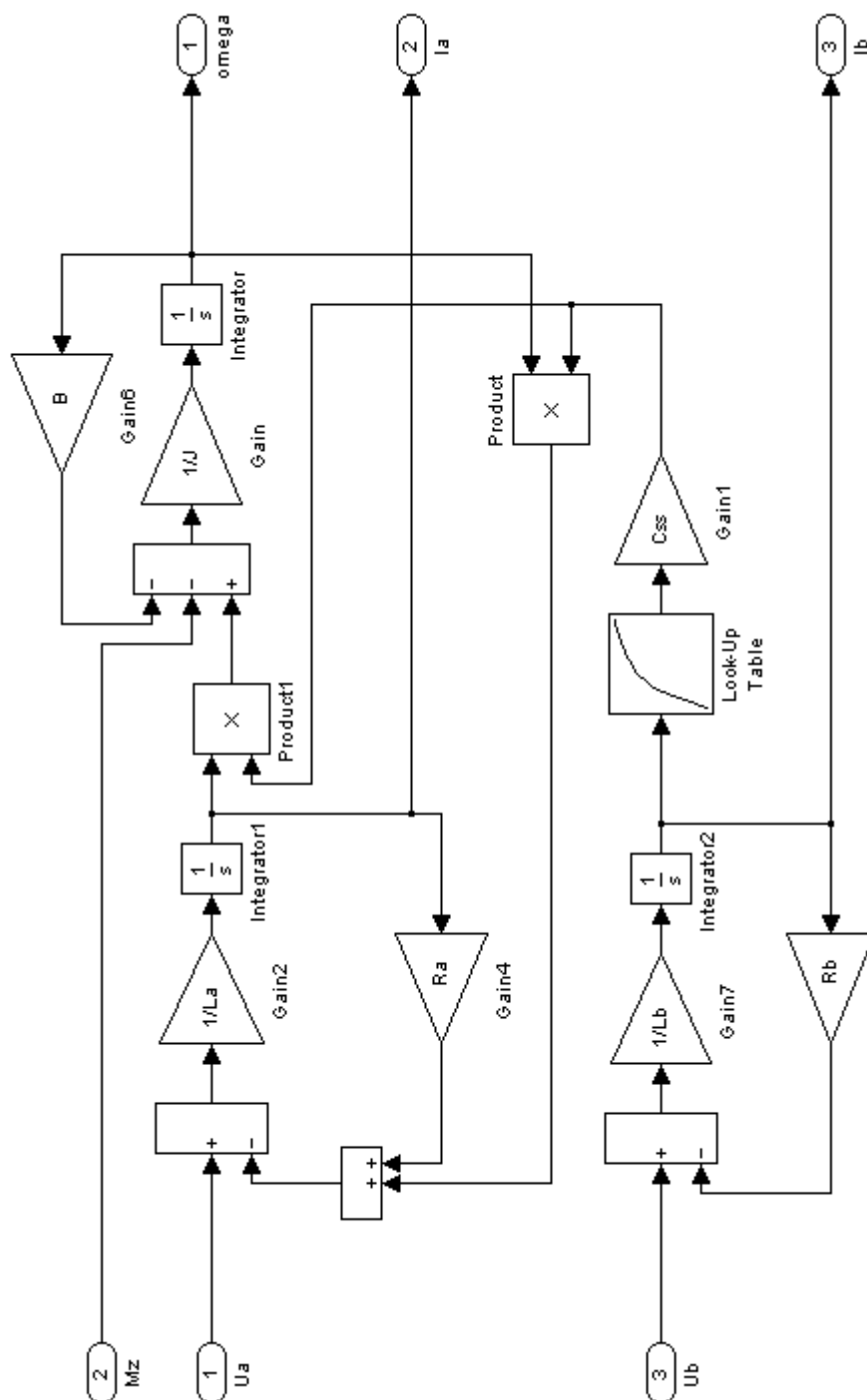
Na základě rovnic (2.14), (2.15), (2.16) lze navrhnout blokové schéma v prostředí MATLAB® Simulink™ znázorněné na obrázku 2.2.



Obr 2.2: Blok motoru

### 2.3.1 Vnitřní struktura bloku stejnosměrného motoru

Model vychází z diferenciálních rovnic (2.14 – 2.16) popisujících motor a je doplněn blokem  $\Phi=f(I_b)$ , který vyjadřuje nelineární magnetizační charakteristiku budícího vinutí.



Obr 2.3: Vnitřní struktura motoru

## 2.4 Matematický model řízeného usměrňovače

K dosažení větší přesnosti schody modelu se skutečným pohonem je potřeba zahrnout do modelové struktury řízený usměrňovač. Řízený usměrňovač se většinou v pohonech středních výkonů používá jako třífázový řízený můstek. Matematický model řízeného usměrňovače je pro potřeby modelování specificky uzpůsoben. Nezahrnuje mnoho funkcí řízeného usměrňovače, jako je okamžitý časový průběh výstupního napětí, velikost komutačního úhlu nebo změny řídicí charakteristiky při režimu s nepřerušovaným a přerušovaným proudem.

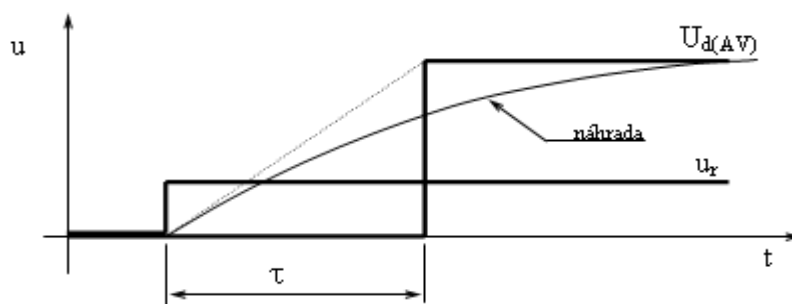
Velikost výstupního napětí usměrňovače se řídí velikostí řídicího napětí, které je výstupní veličinou regulátoru. Poněvadž velikost usměrňovaného napětí závisí na řídicím úhlu, je třeba převést řídicí napětí na úhel.

### 2.4.1 Dynamický model řízeného usměrňovače

Pokud regulátor pohonu změní velikost řídicího napětí usměrňovače  $u_r$ , střední hodnota výstupního napětí  $U_{d(AV)}$  se nezmění okamžitě, ale až po uplynutí doby dopravního zpoždění  $\tau$ . Důvodem je skutečnost, že generátor impulsů dodává jednotlivé impulzy s určitým časovým odstupem, jehož velikost závisí na typu usměrňovače. Velikost dopravního zpoždění je závislá především na okamžiku, kdy se mění řídicí úhel usměrňovače a na délce trvání této změny. Podrobným rozбором tohoto jevu se zabývá [8] na straně 88. Pokud se bude uvažovat použití  $q$  pulsního řízeného usměrňovače napájeného střídavým napětím s frekvencí  $f$ , pak doba trvání jednoho pulzu je  $1/qf$ .

$$T_{av} = \frac{1}{2} q \cdot f \quad (2.17)$$

Jak bylo řečeno dříve, doba konkrétního dopravního zpoždění závisí na mnoha okolnostech. Proto se pro regulační úvahy používá průměrná doba dopravního zpoždění jako polovina doby trvání jednoho pulzu. Řídicí jednotky SIMOREG používají šesti pulsní řízené usměrňovače, v tomto případě napájeného napětím s frekvencí 50Hz. Pak  $T_{av} = 1,67$  ms. Chování takového modelu ukazuje obr.2.4.



Obr 2.4: Průběh řídicího napětí a střední hodnoty usměrněného napětí

Pro analytické vyjádření nebo matematické zpracování je vhodné nahradit zpožděný skokový průběh střední hodnoty usměrněného napětí exponenciálou, jejíž časová konstanta je rovna dopravnímu zpoždění. Pak platí

$$U_{d(AV)} = K_U \cdot u_r \cdot (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \quad (2.18)$$

kde  $K_U$  má význam statického zesílení řízeného usměrňovače.

Obrazový přenos definovaný poměrem výstupní a vstupní veličiny se vyjádří jako

$$F_u(s) = \frac{U_{d(AV)}(s)}{u_r(s)} = \frac{K_U}{1 + \tau s} \quad (2.19)$$

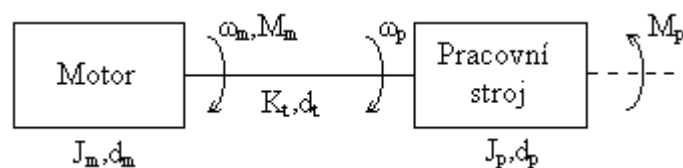
Z uvedeného vyplývá, že pro účely simulace stejnosměrného pohonu stačí nahradit řízený usměrňovač soustavou prvního řádu, jejíž časová konstanta je rovna

$$\tau = T_{AV} = \frac{1}{2qf} = \frac{1}{2 \cdot 6 \cdot 50} = 1,67 \text{ ms} \quad (2.20)$$

Do simulačního schéma se přidá soustava 1. řádu s časovou konstantou 1,67 ms a zesílením 1 (aby žádaná a skutečná hodnota otáček odpovídala). Vzhledem k velikosti časové konstanty  $\tau$  nedojde k příliš velké změně v dynamice modelu.

## 2.5 Pružná spojka

V některých případech je mezi motorem a pracovním strojem pružná spojka nebo dlouhý hřídel, který je pružný a je namáhaný na zkrut. Uvažuje se tedy lineární tlumená mechanická soustava o dvou stupních volnosti, která se skládá z kotouče rotoru motoru, z kotouče pracovního mechanismu a z nehmotné pružné vazby, která oba kotouče spojuje. Struktura mechanické vazby je uvedena na obr. 2.5



Obr 2.5: Motor ve spojení s pracovním strojem

V tomto případě se musí provést rozbor soustavy s dvěma momenty setrvačnosti. Při rozběhu se urychlí setrvačnost hmoty motoru a dojde k natočení hřídele o úhel  $\Delta\varphi$ , kterému podle Hookova zákona odpovídá torzní moment.

$$M_t = \frac{\pi \cdot D^4}{32} \cdot \frac{G}{l_1} \cdot \Delta\varphi = K_t \cdot \Delta\varphi = K_t \int (\omega_m - \omega_p) dt \quad (2.21)$$

kde

D...	průměr hřídele
G...	modul pružnosti
$l_1$ ...	délka hřídele
$\omega_m, \omega_p$ ...	okamžité úhlové hodnoty rychlosti motoru a pracovního stroje
$\Delta\varphi$ ...	úhlová deformace (zkrut)
$K_t$ ...	torzní tuhost pružné vazby

Soustava z obr.2.5 bude popsána následujícími pohybovými rovnicemi:

$$M_m = J_m \cdot \frac{d\omega_m}{dt} + d_m \cdot \omega_m + M_t \quad (2.22)$$

$$M_t = K_t (\varphi_m - \varphi_p) + d_t (\omega_m - \omega_p) \quad (2.23)$$

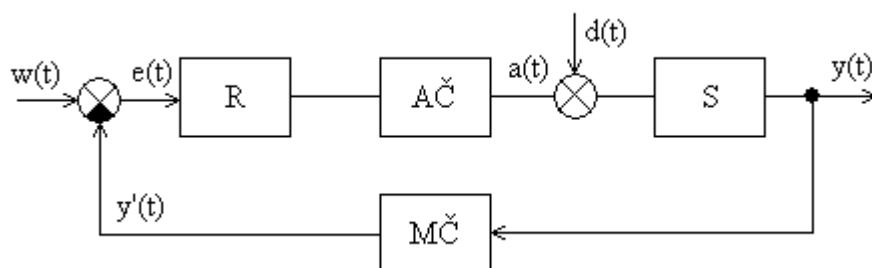
$$M_t = J_p \cdot \frac{d\omega_p}{dt} + d_p \cdot \omega_p + M_p \quad (2.24)$$

Význam veličin je patrný z obr.2.5,  $d_m$ ,  $d_t$ ,  $d_p$ , jsou činitele tlumení, přičemž velmi zjednodušeně se uvažuje, že tlumící moment je úměrný úhlové rychlosti. Vztah (2.22) vyjadřuje momentovou vazbu mezi motorem a pružným členem, kde další závislost popisuje vazbu mezi motorem a pracovním strojem a (2.24) popisuje vlastní pracovní stroj se zatěžujícím momentem.

## 2.6 Regulace stejnosměrného motoru

Jednou z nejdůležitějších složek výrobního pochodu je řízení a regulace.

- Řízení označuje cílevědomou činnost, založenou na vyhodnocení a zpracování informací o řízeném objektu a dějích vně tohoto objektu. Výsledkem jsou zásahy, vedoucí k zadanému cíli při splnění určitých kritérií.
- Regulace je nejdůležitějším a nejčastějším typem řízení. Zaručuje udržení fyzikálních veličin na předem stanovených hodnotách, případně zajištění nejvýhodnějšího přechodu na nové zadané hodnoty podle určitých optimalizačních kritérií. V průběhu regulace se vyhodnocují okamžité hodnoty regulovaných veličin a odezvy na regulační zásah. Podle nich je aktuálně korigována činnost regulátoru. Technicky řečeno, regulátor pracuje se zpětnou vazbou a zajišťuje potřebnou přesnost a dynamiku. Na obr.2.6 je principiální schéma regulačního obvodu.



Obr 2.6: Princip regulačního obvodu

Popis obvodu:

R... regulátor

AČ... akční člen

S... regulovaná soustava

MČ... měřící člen

Signály:

$w(t)$ ... žádaná veličina

$e(t)$ ... regulační odchylka

$a(t)$ ... akční zásah

$y(t)$ ... regulovaná veličina

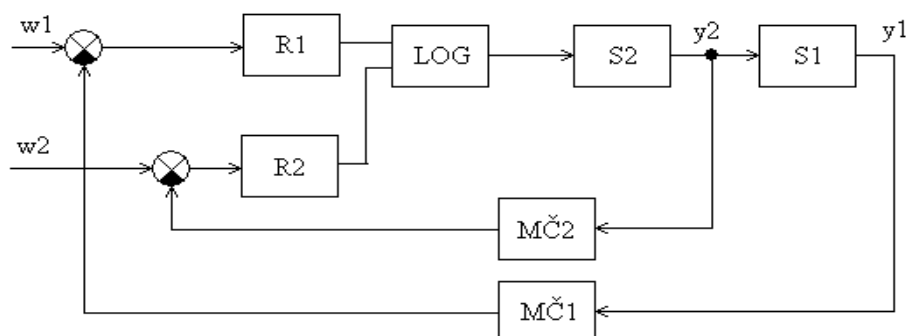
$z(t)$ ... porucha

Regulace v elektrických pohonech je charakterizována především vysokou požadovanou rychlostí zásahu. Výstupní veličina ze systému se nazývá regulovaná veličina a je udržována v předepsaných mezích. V elektrických pohonech to může být poloha, otáčivá rychlost nebo moment.

## 2.7 Druhy regulace stejnosměrného motoru

Stejnosměrný stroj je točivý elektrický stroj na stejnosměrný proud, který může pracovat jako generátor stejnosměrného proudu (dynamo), je-li mechanicky poháněn, nebo jako stejnosměrný motor, je-li napájen ze stejnosměrné sítě. Používají se všude tam, kde se

požaduje plynulé a hospodárné řízení rychlosti v případech, kdy je nelze nahradit jednoduššími střídavými stroji.

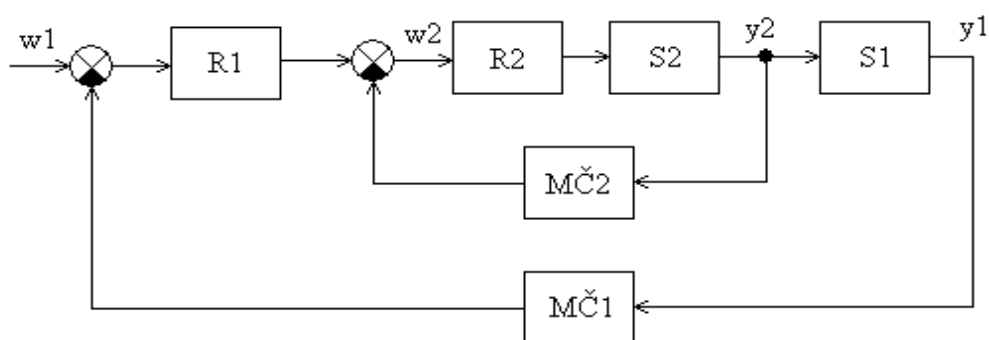


Obr 2.7: Paralelní regulace otáček a proudu

Pro regulaci stejnosměrných motorů se používá několik druhů zapojení.

**Paralelní regulace otáček a proudu** využívá změnu velikosti statorového napětí pomocí tyristorového můstku. Paralelní zapojení regulátoru otáček  $R1$  a regulátoru proudu  $R2$  zaručuje výbornou stabilitu obvodu, ale obtížný je výpočet parametrů regulátorů a jejich nastavení, protože oba regulační obvody se navzájem ovlivňují.

Jednodušší pro nastavení i výpočet konstant regulátorů je použití **regulace otáček s podřízenou regulací proudu** podle obr.2.8. V praxi se nejčastěji používá tato hierarchická struktura regulačního zapojení. Smyčka 1 je otáčková a podřízená smyčka 2 je proudová.



Obr 2.8: Regulace otáček s podřízenou regulací proudu

### 3 Nalezení parametrů motoru pro potřeby modelování

Sestavení samotného modelu motoru předcházelo měření a další zpracování všech parametrů motoru, které jsou potřeba pro modelování.

#### 3.1 Štítkové údaje motoru

typ:	1GG5104-0EB20-6UV1-Z
výrobce:	SIEMENS
buzení:	cizí
chlazení:	externí
jmenovité otáčky:	960 ot/min
rozsah otáček:	10 – 1000 ot/min, (max. 1100 ot/min)
jmenovitý výkon:	1,92 kW
parametry kotvy:	
napětí:	110 – 420 V
proud:	7 A
parametry budícího vinutí:	
proud:	1,25 A při 220 V; 0,84 A při 145 V

#### 3.2 Měření odporu kotvy a buzení motoru

Pro měření odporu byl použit stejnosměrný stabilizovaný zdroj proudu, který byl nastavený na jmenovitou hodnotu proudu  $I = 1\text{ A}$ . Napětí kotvy a buzení bylo měřeno na multimetru. Pro větší přesnost bylo měření opakováno na třech různých multimetrech.

Pro  $I = 1\text{ A}$  platí:

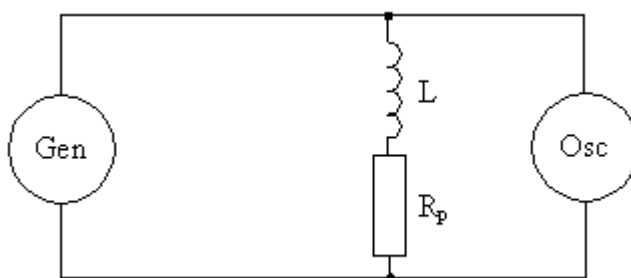
přístroj	RE3900 RNO:20017432	RE3900 RNO:20024553	Finest509 SN:683569
$U_b$ [V]	135,67	135,56	135,65
$U_a$ [V]	12,25	12,18	12,56
$R_b$ [ $\Omega$ ]	135,67	135,56	135,65
$R_a$ [ $\Omega$ ]	12,25	12,18	12,56

Tab 3.1: Odporů na buzení a kotvě



### 3.3 Měření indukčnosti kotvy a buzení motoru

K měření indukčnosti byl použit osciloskop a generátor zapojený podle obr.3.1. Na generátoru napětí bylo nastaveno  $U_{pp} = 20V$ . Osciloskopem se zaznamenávala hodnota napětí a proudu na vinutí rotoru i statoru. K vyhodnocení indukčnosti je třeba zjistit časovou konstantu, což lze více způsoby. Zde je uvedena metoda identifikace proudové křivky proložením exponenciální funkcí. K identifikaci průběhu proudu byl použit softwarový prostředek MATLAB®.



Obr 3.1: Schéma zapojení osciloskopu a generátoru k vinutí motoru

$L...$  indukčnost vinutí motoru [H]

$Gen...$  generátor

$R_p...$  pomocný odpor [ $\Omega$ ]

$Osc...$  osciloskop

#### 3.3.1 Vyhodnocení indukčnosti kotvy motoru

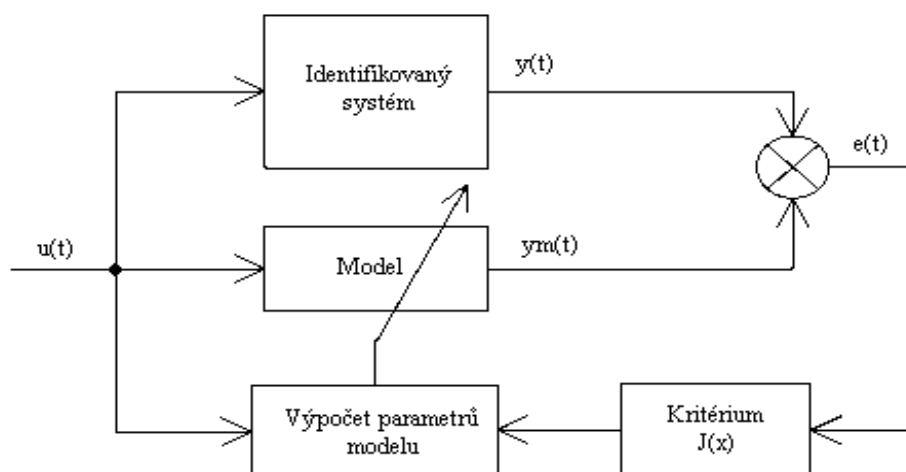
Na osciloskopu byl naměřen průběh proudu na kotvě motoru jak ukazuje graf 3.1. Proud indukčnosti má při zapnutí obvodu exponenciální průběh podle vztahu

$$I = I_0 \cdot (1 - e^{-t/\tau}) \quad (3.1)$$

Průběh proudu (3.1) vlastně vyjadřuje systém prvního řádu

$$S(s) = \frac{I_0}{\tau \cdot s + 1} \quad (3.2)$$

a proto je možné využít identifikaci parametrů obrazového přenosu (3.2).



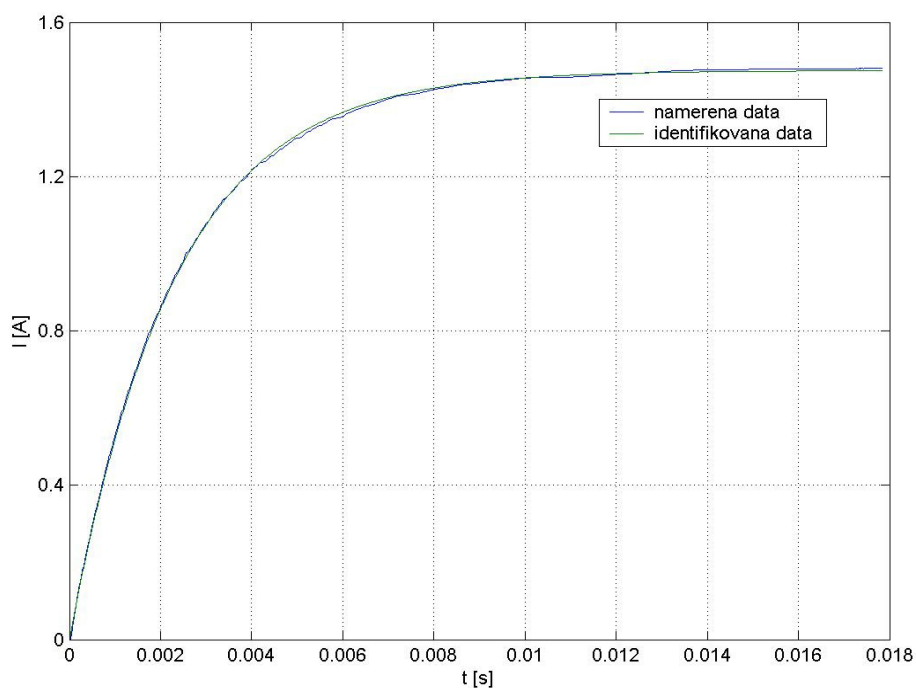
Obr 3.2: Struktura identifikace

Z obr.3.2. je patrné jak probíhá samotná identifikace. Jde o minimalizaci kvadratického

kritéria 
$$J(I_0, \tau) = \sum_{i=1}^N (y_i - y_{Mi})^2, \quad (3.3)$$

z parametru  $\tau$  ve vztahu (3.2) lze určit indukčnost. Podrobnější popis identifikace parametru lze najít v uvedené literatuře [6].

$$L = R \cdot \tau = (R_p + R_a) \cdot \tau = (5,6 + 12,33) \cdot 2,3 \cdot 10^{-3} = 41 \text{ mH} \quad (3.4)$$



Graf 3.1: Proložení proudu exponenciální funkcí, nalezení parametru  $\tau$

$$\tau = 2,3\text{ms}, L_a = 41\text{mH}$$

Postup určení parametru  $\tau$  je v příloze kde jsou uvedeny výpisy souboru identifikace.m a crit.m a také na CD v adresáři *Identifikace*.

### 3.3.2 Vyhodnocení indukčnosti buzení motoru

Původně byl použit obdobný postup zjištění parametru indukčnosti buzení jako u kotvy, ale hodnota, která byla zjištěna neodpovídala řádově běžné indukčnosti motoru. Proto bylo provedeno další měření pomocí LC-metru, který je určen k měření.

Typ přístroje: Tesla BM509, ID: ZP1202, SN: 323136

$$L_b = 220\text{ mH}$$

### 3.4 Určení konstanty buzení

Budící a kotevní vinutí bylo napájeno z dvou řízených zdrojů. Buzení bylo napájeno jmenovitým budícím proudem. Motor byl plynule nastaven na jmenovité otáčky ( $n_n = 1000\text{ ot/min}$ ) a na voltmetru a ampérmetru byl zaznamenány jmenovité hodnoty napětí a proudu.

$$U_{b1} = 224\text{ V} \quad I_{b1} = 1.34\text{ A}$$

$$U_{a1} = 320\text{ V} \quad I_{a1} = 0.37\text{ A}$$

Konstanta buzení byla vypočtena ze vztahu:

$$C_{ss} \Phi_n = \frac{U_a - I_a \cdot R_a}{\omega_n} = \frac{320 - 0,37 \cdot 12,25}{104,7} = 3,01\text{ V.s} \quad , \quad (3.5)$$

$$\omega_n = 2 \cdot \pi \cdot \frac{n_n}{60} = 2 \cdot \pi \cdot \frac{1000}{60} = 104,7\text{ rad/s} \quad (3.6)$$

kde

$n_n \dots$	jmenovité otáčky [ot/min]
$\omega_n \dots$	jmenovité otáčky [rad/s]
$R_a \dots$	odpor kotvy obvodu [ $\Omega$ ]
$U_{a1} \dots$	napětí na kotvě při chodu naprázdno [V]
$I_{a1} \dots$	proud na kotvě při chodu naprázdno [A]
$U_{b1} \dots$	budící napětí [V]
$I_{b1} \dots$	budící proud [A]

### 3.5 Zjištění parametru $C_{ss}$

Měřením motoru naprázdno byla zjištěna nelineární závislost  $C_{ss}\Phi = f(I_b)$ , a poněvadž hodnota samotného parametru  $C_{ss}$  je dána konstrukčním provedením elektromotoru, musí platit  $C_{ss} = konst.$  Velikost  $C_{ss}$  lze zjistit z lineární části z Grafu 3.2. Konstanta buzení motoru  $C_{ss}\Phi$  byla zjištěna měřením, které popisuje kapitola 3.6.

Konstantu  $C_{ss}$  lze spočítat ze vztahu

$$C_{ss} = \frac{C_{ss}\Phi}{\Phi} = \frac{C_{ss}\Phi}{L_b \cdot I_b} \quad (3.7)$$

kde  $L_b$  je indukčnost budícího vinutí získaná měřením. Za předpokladu změřených veličin  $C_{ss}\Phi$  a  $I_b$  lze hodnotu  $C_{ss}$  určit jako aritmetický průměr ze tří hodnot v lineární části.

$I_b [A]$	0.14	0.21	0.3	0.41	0.5	0.6	0.71	0.79	0.89	1.01
$C_{ss} [-]$	38.2	37.89	36.29	34.01	30.69	27.38	24.39	22.64	20.74	18.78

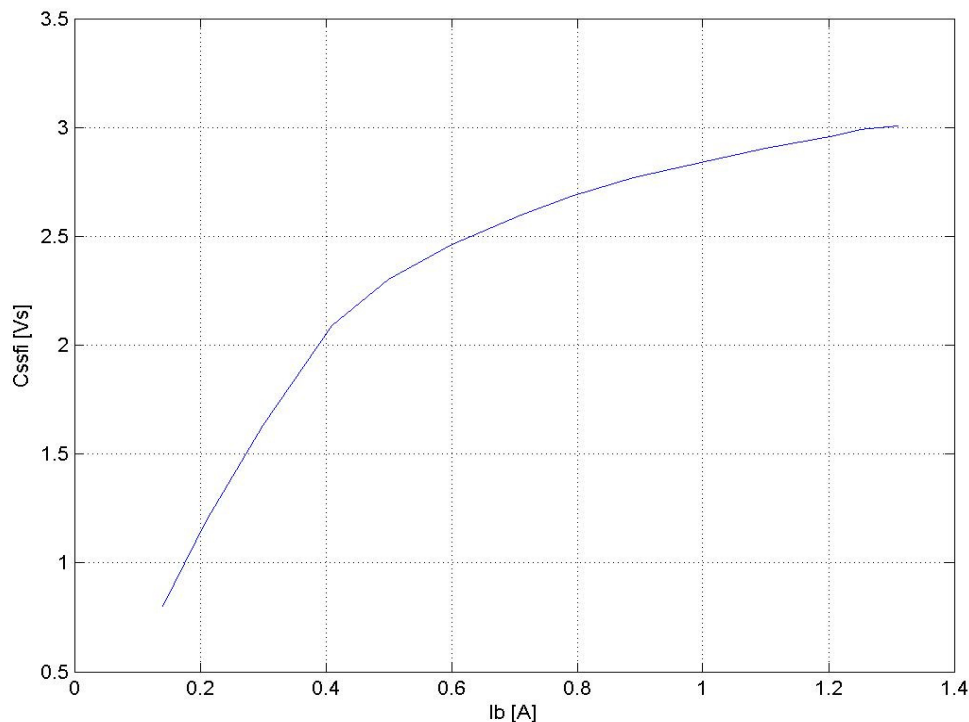
1.1	1.25
17.59	15.94

Tab 3.2: Hodnoty parametru  $C_{ss}$

Za předpokladu změřených veličin  $C_{ss}\Phi$  a  $I_b$  lze hodnotu  $C_{ss}$  určit jako aritmetický průměr ze tří hodnot v lineární části

$$C_{ss} = \frac{1}{3}(38,2 + 37,89 + 36,29) = 37,46 \quad (3.8)$$

Charakteristika  $C_{ss}\Phi = f(I_b)$  je nelineární, protože indukčnost budícího vinutí je závislá na velikosti budícího proudu.



Graf 3.2: Závislost  $C_{ss}\Phi=f(I_b)$  získaná měřením

Ze závislosti  $C_{ss}\Phi = f(I_b)$  při známé konstrukční konstantě motoru lze vyjádřit vztah  $\Phi = f(I_b)$ , který byl zahrnut do modelu motoru.

### 3.6 Měření momentu setrvačnosti

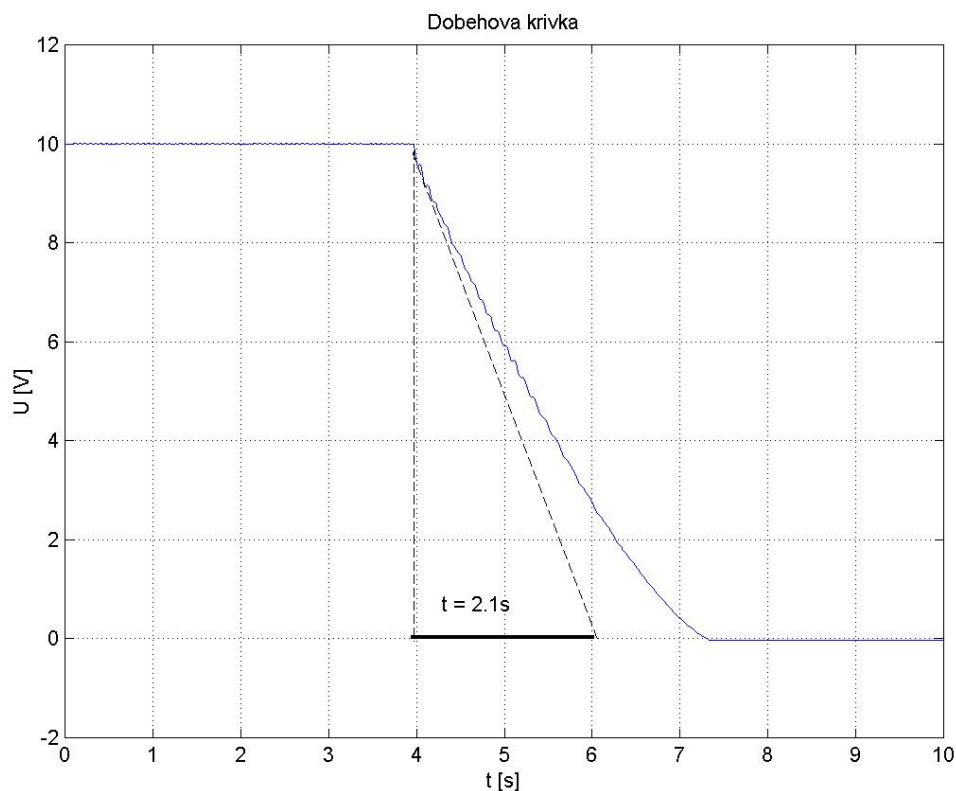
Stejnoseměrný motor je spojen hřídelí s asynchronním motorem a celé uskupení tvoří soustrojí. Stanovení momentu setrvačnosti je založeno na určení závislosti otáček na čase při doběhu pomocí osciloskopu.. Z doběhové křivky je možné stanovit zpoždění soustrojí. Měření bylo provedeno pomocí rozběhu stejnosměrného motoru na jmenovité otáčky. Motor byl poté odpojen od sítě a na osciloskopu, pomocí analogového výstupu z jednotky Simoreg, byla naměřena doběhová křivka. Zlomu křivky odpovídá jmenovitá úhlová rychlost, při které po odpojení motoru od zdroje začíná doběh. Konec doběhu je ve zlomu, kde přechází křivka rovnoběžně k časové základně. Z naměřené křivky se určí ideální doba doběhu  $t_i$ .

Moment setrvačnosti se určí ze vztahu:

$$J = \Delta t \cdot \frac{U_{al} \cdot I_{al}}{\omega_n^2} = 2,1 \cdot \frac{320,0,37}{104,7^2} = 0,0227 \text{ kgm}^2 \quad (3.9)$$

kde

$\Delta t$ ... je doba doběhu, určena z doběhové křivky



Graf 3.3: Naměřená doběhová křivka soustrojí

### 3.7 Měření charakteristiky naprázdno

Charakteristika naprázdno znázorňuje průběh kotevního napětí  $U_a$  nezatíženého stejnosměrného motoru na budícím proudu  $I_b$  při konstantních otáčkách. Pomocí asynchronního motoru byl pohon roztočen na 1000 ot/min, což lze považovat za jmenovité otáčky stejnosměrného motoru. Nejdříve se motor plně nabudí jmenovitým budícím proudem a postupně se snižuje až do nulové hodnoty.

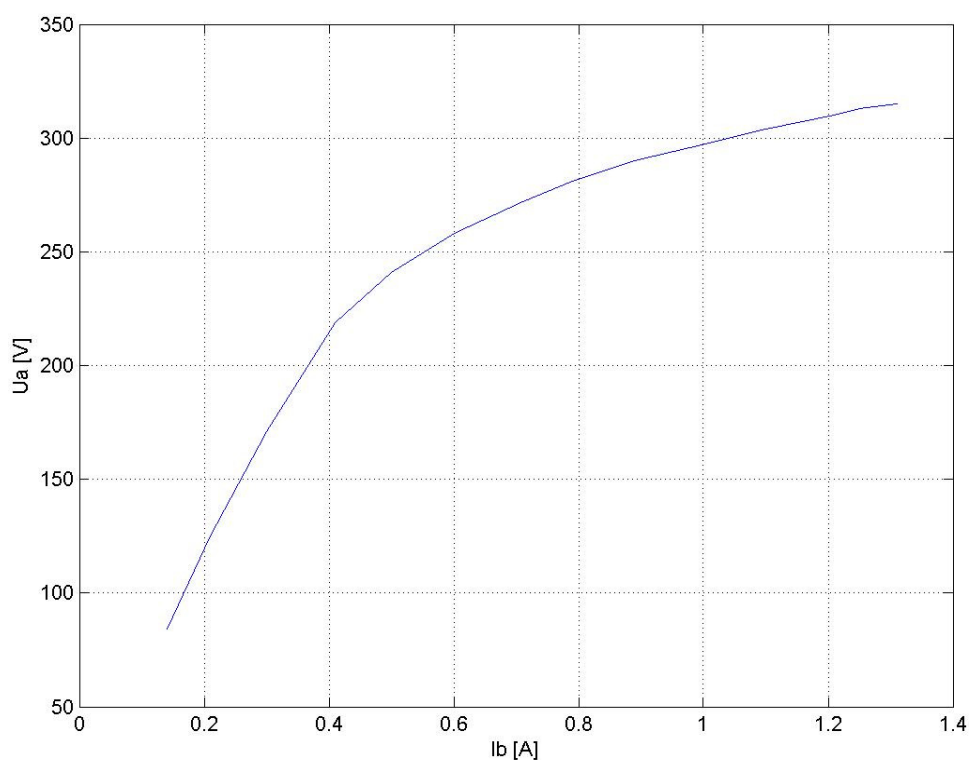
Pro výpočet  $C\Phi$  platí následující vztah:

$$C_{ss}\Phi = \frac{U_a}{\omega} = \frac{U_a}{104,7} \quad (3.10)$$

Naměřené hodnoty naprázdno:

$I_b$ [A]	0.14	0.21	0.3	0.41	0.5	0.6	0.71	0.79	0.89	1.01	1.1	1.25
$U_a$ [V]	84	125	171	219	241	258	272	281	290	298	304	313
$C_{ss}\Phi$ [Vs]	0.8	1.19	1.63	2.09	2.3	2.46	2.59	2.68	2.77	2.85	2.91	2.99

Tab 3.3: Hodnoty parametru  $C_{ss}\Phi$  získané měřením



Graf 3.4: Charakteristika naprázdno

### 3.8 Měření zatěžovací charakteristiky

Pro měření zatěžovací charakteristiky byl ss motor zatěžován asynchronním motorem připojeným na Simovert. Otáčky  $n$  stejnosměrného motoru se zvětšující se zátěží klesají, proud kotvy  $I_a$  roste a točivý moment  $M_s$  se zvyšuje. Moment na hřídeli stejnosměrného

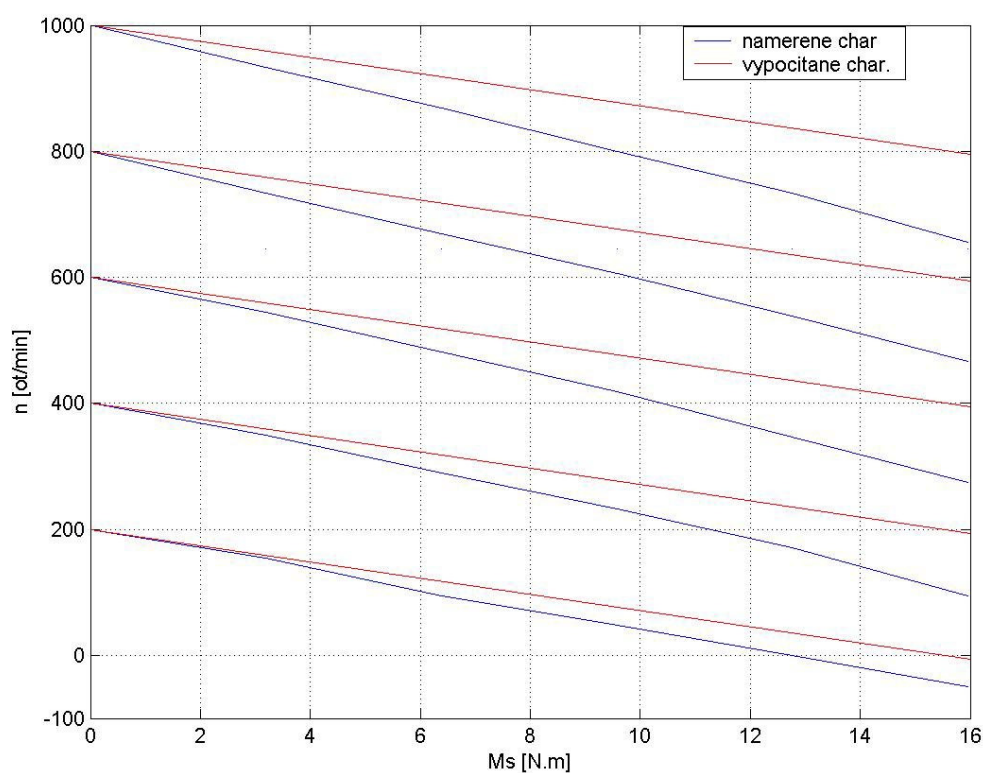
motoru byl získán po přepočtu z vizualizačního parametru r007, měniče Simovert. Podle referenčního manuálu [12] byl odvozen vztah pro moment na hřídeli ss motoru.

$$M_s = r007 \cdot M_{jm} \cdot 1,15 = r007 \cdot 17,25 \quad (3.11)$$

kde

$M_{jm}...$  jmenovitý moment asynchronního motoru

$M_s...$  moment na hřídeli ss motoru



Graf 3.5: Zatěžovací charakteristiky stejnosměrného motoru

Vypočítané charakteristiky vycházejí „tvrdší“ nežli naměřené. Větší pokles otáček se zatížením při napájení z řízeného usměrňovače je dán tím, že vznikají větší ztráty. Naměřené data jsou uvedeny v příloze, zde jsou výsledné zatěžovací charakteristiky uvedeny v grafické podobě.

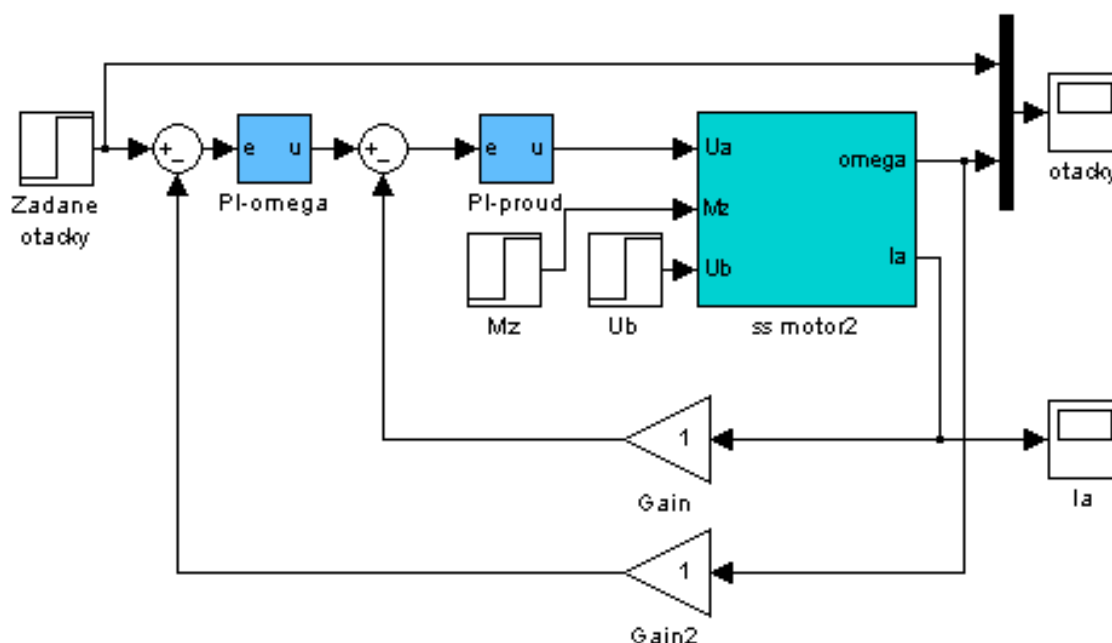


## 4 Modelování stejnosměrného motoru s otáčkovou a proudovou zpětnou vazbou a pružnou spojkou

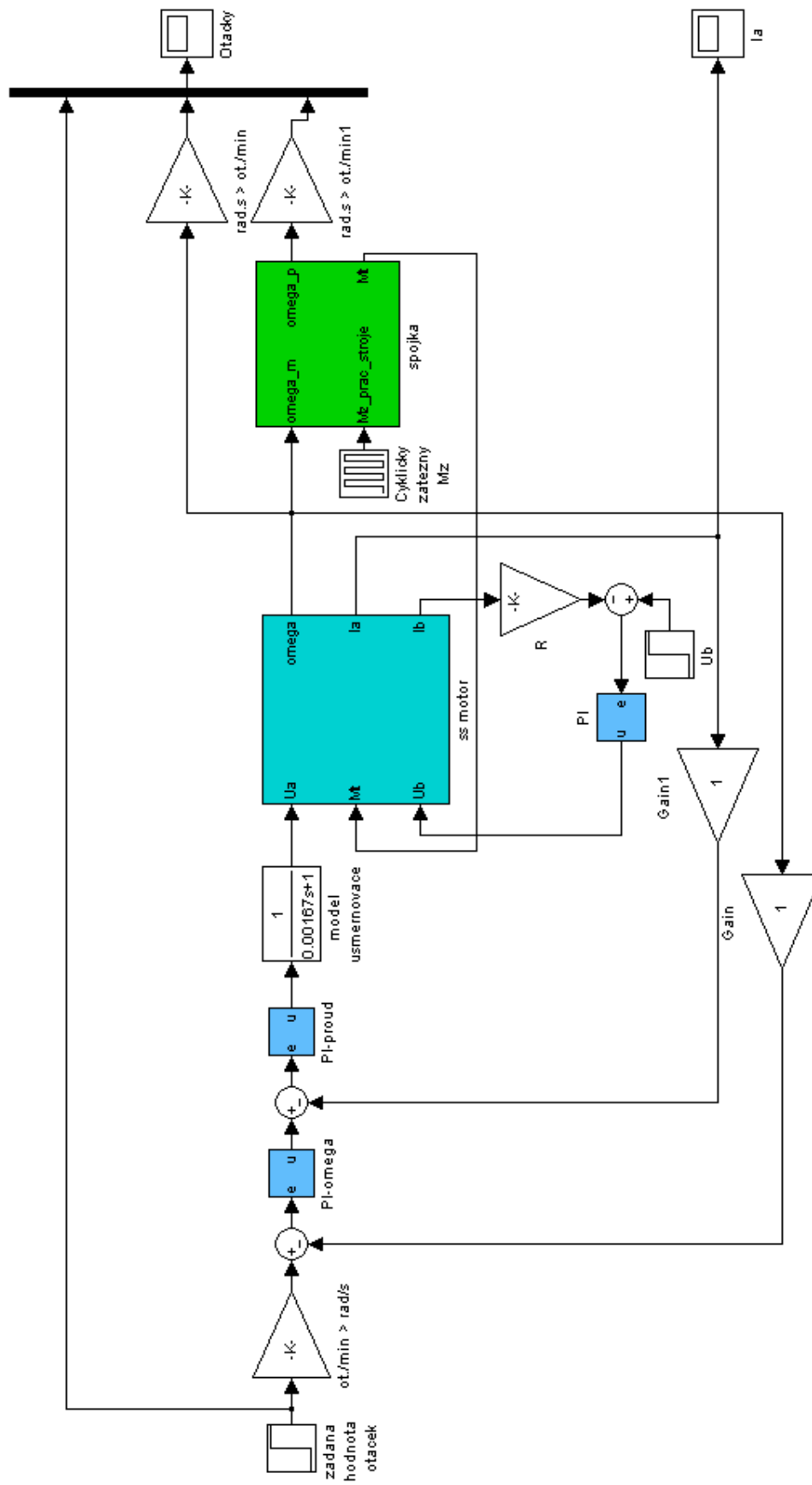
### 4.1 Model stejnosměrného motoru s cizím buzením s proudovou a otáčkovou zpětnou vazbou a pružnou spojkou

Celý model motoru se zpětnými vazbami a pružnou spojkou byl realizován v prostředí programu MATLAB® - Simulink™ bližší informace lze najít na webových stránkách [www.mathworks.com](http://www.mathworks.com).

Model se skládá ze tří souborů (*model.mdl*, *model\_spojka.mdl* a *parametry.m*). Uvedené soubory se nacházejí na přiloženém CD a výpis zdrojového m-souboru je uveden taktéž v příloze. V souboru *parametry.m* jsou definovány jednotlivé hodnoty systému, zjištěné měřením a výpočty zpracované v kapitole 3., potřebné pro běh simulace. Před samotnou simulací je zapotřebí tento soubor spustit, aby se parametry načetli do paměti a mohla být spuštěna simulace. Model je uložen v souboru *model.mdl* a *model\_spojka.mdl*, kde první uvedený model je zobrazen na obr.4.1. Druhý model (obr.4.2.) zahrnuje spojkou, který modeluje pružné spojení s asynchronním motorem. Po spuštění dochází k numerickému výpočtu celého modelu a tím jsou získány jednotlivé výsledky.



Obr 4.1: Regulační zapojení



Obr 4.2: Model regulační struktury

#### 4.1.1 Popis jednotlivých funkčních bloků modelu

**ss motor** – základní blok , který tvoří jádro celého modelu. Motor byl popsán v kapitole 2.3. Výstupy z bloku jsou připojeny na bloky Scope, které umožňují vizualizaci výstupních veličin (otáčky motoru, proud kotvy).

**spojka** – vyjadřuje spojení stejnosměrného motoru s rotorem asynchronního motoru a vliv pružné spojky na dynamiku pohonu. Pružná spojka byla teoreticky popsána v kapitole 2.5. Vstupy do bloku jsou výstupní otáčky stejnosměrného motoru a zatěžovací moment, jehož průběh může být v čase konstantní i proměnný, podle požadovaného průběhu. Ze simulací, které byly provedeny vyplynulo, že použitá spojka se spíše chová jako měrný člen, který je hodně tuhý a neovlivňuje výstupní otáčky. Nebyly k dispozici potřebné parametry, jako je rozměrová dokumentace a použitý materiál spojky a proto byla konstanta tuhosti  $K_t$  určena jen orientačně a spolu se zvoleným činitelem tlumení  $d_t$  neovlivnila přechodový děj při rozběhu pohonu.

**model usměrňovače** – usměrňovač byl modelován jako zpožďující blok, který má exponenciální charakter a nahrazuje skokovou změnu řídicího napětí a dopravní zpoždění. Popis uveden v kapitole 2.4.

**regulátory** – jsou to bloky realizující PI regulátory, což je tvar, který neobsahuje třetí derivační složku. Obecný tvar PID regulátoru se může psát jako

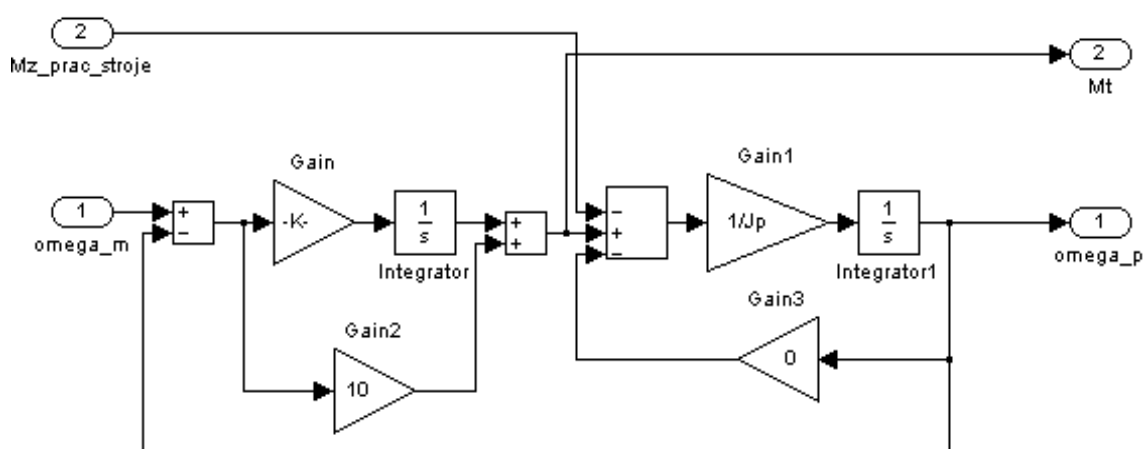
$$R_{(s)} = K_p \cdot \left( 1 + \frac{1}{T_i \cdot s} + T_d \cdot s \right) , \quad (4.1)$$

kde  $K_p$  je proporcionální složka,  $T_i$  je časová integrační konstanta a  $T_d$  je derivační konstanta. Regulační struktury u pohonu většinou neobsahují derivační složku. Proudový regulátor v obvodu kotvy byl nastaven „defaultně“, jako v regulační struktuře Simoreg. Nastavení konstant regulátoru nebylo v průběhu měření měněno, tím bylo respektováno doporučení od výrobce. Regulátor v obvodu buzení má prakticky význam takový, aby byla uzavřená zpětná vazba, přičemž regulační odchylka do regulátoru je nulová a tudíž je hodnota budícího napětí stejná, jako

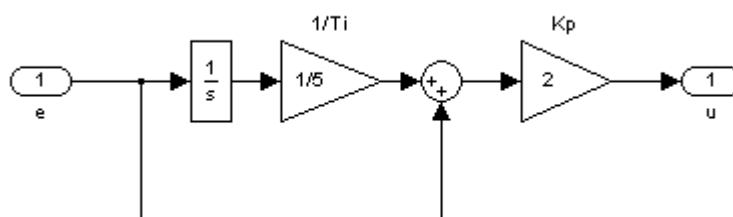
kdyby byla na vstup přivedena skoková hodnota  $U_b$ . Vnitřní struktura PI regulátoru je na obr.4.3.

$\text{ot/min} > \text{rad/s}$  – uskutečňuje transformaci vstupních otáček za minutu na otáčky za sekundu

$\text{rad/s} > \text{ot/min}$  – transformační blok, který převádí výstupní otáčky za sekundu na otáčky za minutu.



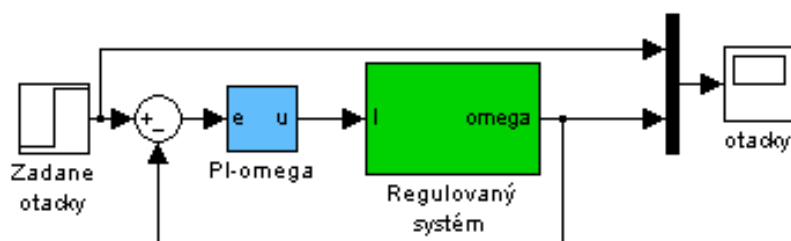
Obr 4.3: Vnitřní struktura spojky



Obr 4.4: Vnitřní struktura regulátoru

## 5 Stabilita systému

Stabilita je jedním ze základních požadavků, který se klade na regulační obvod. Regulační obvod je stabilní, jestliže po vychýlení regulačního obvodu z rovnovážného stavu a odeznění vnějších sil, které tuto odchylku způsobily, se regulační obvod během času znovu vrátí do původního rovnovážného stavu. Jinak řečeno je **stabilita vlastnost regulačního obvodu udržet se v okolí rovnovážného stavu nebo se do něj vrátit po odeznění vnějších působících sil**. Stabilita byla provedena pro systém na obr.5.1, který ukazuje regulační zapojení obvodu (vnitřní struktura systému je uvedena v příloze a na CD v adresáři *Stabilita*).



Obr 5.1: Struktura regulačního obvodu

Regulační obvod podle obr.5.1. má přenos řízení dán rovnicí (5.1.), který navíc bude jako podíl obecných polynomů

$$F_{uz}(s) = \frac{F_0(s)}{1 + F_0(s)} = \frac{F_{(s)} \cdot R_{(s)}}{1 + F_{(s)} \cdot R_{(s)}} = \frac{b_m s^m + \dots + b_1 s + b_0}{a_n s^n + \dots + a_1 s + a_0} \quad (5.1)$$

Jestliže se položí jmenovatel přenosu řízení roven nule vznikne charakteristická rovnice regulačního obvodu

$$1 + F_0(s) = 0 \quad (5.2)$$

$$a_n s^n + \dots + a_1 s + a_0 = 0 \quad (5.3)$$

Regulační obvod je stabilní, jestliže všechny kořeny  $s_1, s_2, \dots, s_n$  charakteristické rovnice (5.3) jsou záporná čísla a v případě komplexních kořenů mají tyto kořeny zápornou reálnou část. V případě, že některý z kořenů leží na imaginární ose a žádný neleží v pravé komplexní polorovině, je obvod na hranici stability.

### 5.1 Hurwitzovo kritérium stability

Vychází z charakteristické rovnice (5.3) a platí zde tzv. **Stodolova nutná podmínka stability**, která zní: "Všechny koeficienty charakteristické rovnice  $a_i$  musí existovat

**a musí mít stejné znaménko".** Je-li charakteristický mnohočlen řádu  $n \leq 2$ , Stodolova podmínka přechází v nutnou a postačující podmínku stability. Jinak je nutno sestavit z koeficientů charakteristické rovnice Hurwitzův determinant  $n$ -tého stupně ve tvaru

$$H_n = \begin{vmatrix} a_{n-1} & a_{n-3} & a_{n-5} & \dots & 0 \\ a_n & a_{n-2} & a_{n-4} & \dots & 0 \\ 0 & a_{n-1} & a_{n-3} & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & a_0 \end{vmatrix} \quad (5.4)$$

Z tohoto determinantu  $H_n$ , který je  $n$ -tého stupně ( $n$  řádků,  $n$  sloupců) se utvoří subdeterminanty  $H_{n-1}$  až  $H_1$  tak, že se vždy vynechá poslední řádek a poslední sloupec. Obvod je stabilní (kořeny charakteristické rovnice jsou záporné nebo mají zápornou reálnou část), když determinant  $H_n$  a všechny subdeterminanty  $H_{n-1}$  až  $H_1$  jsou kladné ( $n$  je stupeň charakteristické rovnice). Je-li některý z determinantů nulový, je obvod na mezi stability.

### 5.1.1 Výpočet stability pro regulační obvod

Pro regulační zapojení (obr.4.1) byl pomocí **Masonova vzorce** zjištěn výsledný přenos uzavřeného obvodu, který zde bude ve stručnosti popsán. Pro správné určení výsledného přenosu jsou určující přenosy v přímých větvích, přenosy ve smyčkách a jejich vzájemná poloha.

**Přímou větví** se rozumí orientovaný signálový tok spojující vstup s výstupem tak, že každý prvek větve se v něm vyskytuje pouze jednou. Přenos přímé větve je součin všech přenosů prvků větve.

**Zpětnovazební smyčkou** resp. **smyčkou** se rozumí naopak uzavřený orientovaný signálový tok (vrací se do místa, ve kterém již byl) přičemž každý součtový člen i přenosový blok prochází signál ve smyčce pouze jednou. Pro potřebu Masonova vzorce se vzájemná poloha smyček, nebo vzájemná poloha smyčka a přímé větve klasifikuje jako

- dotýkající se smyčky resp. dotýkající se smyčka s přímou větví
- nedotýkající se smyčky resp. nedotýkající se smyčka s přímou větví.

**Nedotýkající se smyčky** (resp. smyčka a přímá větev) jsou takové smyčky a větve, které **nemají společné ani sčítací místo ani blok.**

Výsledný přenos je pak dán zlomkem

$$F_{(s)} = \frac{\sum V_k \cdot D_k}{D} = \frac{\sum V_k (1 - \sum_k S_i^1 + \sum_k S_i^2 - \dots)}{1 - \sum_k S_i^1 + \sum_k S_i^2 - \dots} \quad (5.5)$$

kde  $D$  je tzv. determinant blokového schématu, který je roven

$$D = 1 - \sum S_i^1 + \sum S_i^2 - \sum S_i^3 + \dots \quad (5.6)$$

kde:  $\sum S_i^1$  je součet přenosů všech zpětnovazebních smyček  
 $\sum S_i^2$  je součet součinů přenosů dvou nedotýkajících se smyček  
 $V_k$  je přenos  $k$ -té přímé větve  
 $D_k$  je determinant té části schématu, která se nedotýká  $k$ -té přímé větve

Podle výše uvedených pravidel byl zjištěn následující přenos uzavřeného RO

$$\begin{aligned} b_3 &= 0,07888 \cdot r_0 & a_3 &= 0,023293 \\ b_2 &= 7,17134 \cdot r_0 + 0,07889 \cdot r_1 & a_2 &= 0,7984 + 0,0789 \cdot r_0 \\ b_1 &= 7,1713 \cdot r_1 & a_1 &= 7,1713 \cdot r_1 + 0,0789 \cdot r_0 \\ a_4 &= 7,5977e-5 \cdot s^4 & a_0 &= 7,1713 \cdot r_1 \end{aligned}$$

$$F_{uz} = \frac{b_3 \cdot s^2 + b_2 \cdot s + b_1}{a_4 \cdot s^4 + a_3 \cdot s^3 + a_2 \cdot s^2 + a_1 \cdot s + a_0} \quad (5.7)$$

Z charakteristické rovnice přenosu (5.5) bylo potřeba sestavit Hurwitzovu matici a spočítat subdeterminanty  $H_3, H_2$ . Pro obvod s charakteristickou rovnicí 4. stupně je postačující podmínka stability:  $H_3 > 0$ .

$$H_3 = \begin{vmatrix} a_3 & a_1 & 0 \\ a_4 & a_2 & a_0 \\ 0 & a_3 & a_1 \end{vmatrix} = 9,27 \cdot 10^{-3} r_0^2 + 5,89 \cdot 10^{-5} r_0 r_1 - 4,73 \cdot 10^{-7} r_1^2 + 0,133 r_0 - 2,424 \cdot 10^{-3}$$

$$H_2 = \begin{vmatrix} a_3 & a_1 \\ a_4 & a_2 \end{vmatrix} = 1,29 \cdot 10^{-3} r_0 - 5,99 \cdot 10^{-6} r_1 + 0,019$$

Aby byla splněna podmínka stability, musejí být všechny koeficienty char. rovnice a determinanty  $H_3, H_2$  větší než 0.

$$0,7984 + 0,0789 \cdot r_0 > 0 \quad (1)$$

$$7,1713 \cdot r_1 + 0,0789 \cdot r_0 > 0 \quad (2)$$

$$7,1713 \cdot r_1 > 0 \quad (3)$$

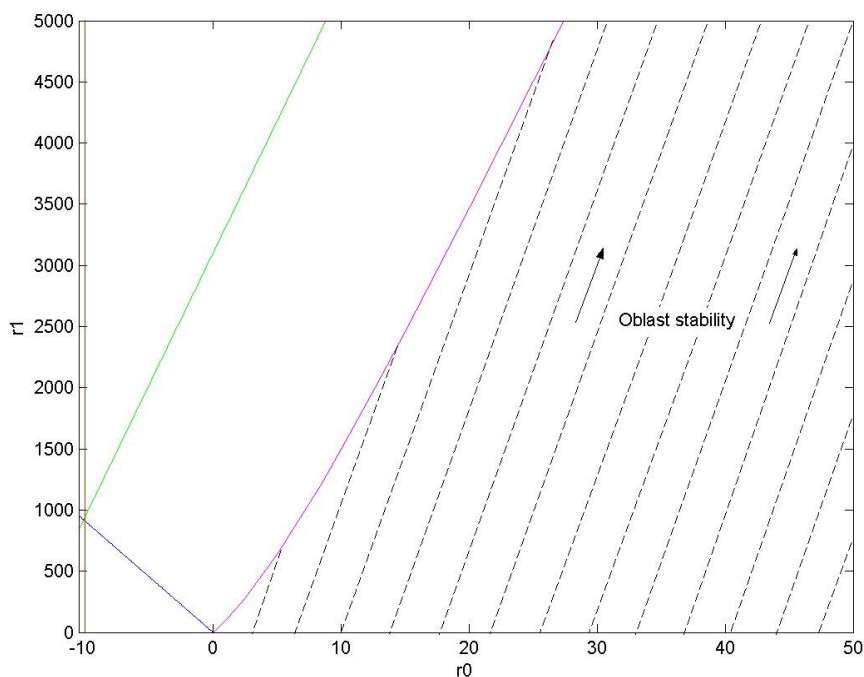
$$H_3 > 0 \quad (4)$$

$$H_2 > 0 \quad (5)$$

Podmínky vymezují oblast stability pro uzavřený regulační obvod. V rovnicích se vyskytují dva parametry  $r_0$  a  $r_1$ , proto lze podmínky vyjádřit graficky pro lepší znázornění jednotlivých parametrů, které definují stabilitu celého obvodu.

$$R_{(s)} = K_p \cdot \left(1 + \frac{1}{T_i \cdot s} + T_d \cdot s\right) = \frac{r_0 \cdot s + r_1}{s} \quad (5.8)$$

Graf 5.1 zobrazuje závislost parametrů otáčkového regulátoru  $r_1$  na  $r_0$ . V grafu jsou zobrazeny všechny podmínky, které plynou z Hurwitzova kriteria, přičemž hlavní podmínka (4) vymezuje napravo od svého průběhu oblast (parametry PI regulátoru  $r_0$  a  $r_1$ ), pro kterou bude uzavřený regulační obvod stabilní.



Graf 5.1: Vyšetření stability uzavřeného regulačního obvodu



## 5.2 Nyquistovo kritérium

Je to frekvenční kritérium, které je založeno na znalosti průběhu frekvenční charakteristiky rozpojeného obvodu. Může být použito i pro regulační obvody s dopravním zpožděním, kde nelze použít algebraických kritérií. Další jeho výhodou je to, že nemusíme znát ani analytický tvar přenosu rozpojeného obvodu, stačí experimentálně získaná frekvenční charakteristika. A proti algebraickým kritériím má přednost také v tom, že stabilita se zkoumá nejen z kvantitativního hlediska (stabilní či nestabilní), ale i z hlediska kvalitativního, jak dalece je obvod stabilní.

Nyquistovo kritérium stability: "Je-li otevřený RO stabilní, pak uzavřený RO bude stabilní právě tehdy, když amplitudo-fázová kmitočtová charakteristika otevřeného regulačního obvodu  $F_0(j\omega)$  neobklopuje kritický bod  $[-1, j0]$ .

Vyšetření stability pro konkrétní případ, kdy je určen výsledný přenos  $F(j\omega)$  (obr.5.1-Regulovaný systém) a k němu je připojen regulátor  $R(j\omega)$ , typu PI. Ověření stability bylo provedeno pro optimální nastavení otáčkového regulátoru a druhý případ je nastavení, které bylo použito při řízené změně zátěžného momentu (kapitola 7.2).

$$F(j\omega) = \frac{0,07889(j\omega) + 7,171}{7,598 \cdot 10^{-5} (j\omega)^3 + 0,02329 (j\omega)^2 + 0,7984 (j\omega)}$$

$$R(j\omega) = \frac{r_0(j\omega) + r_1}{(j\omega)}$$

pro optimální nastavení  $r_0 = 2,02$  a  $r_1 = 6,23$  lze psát

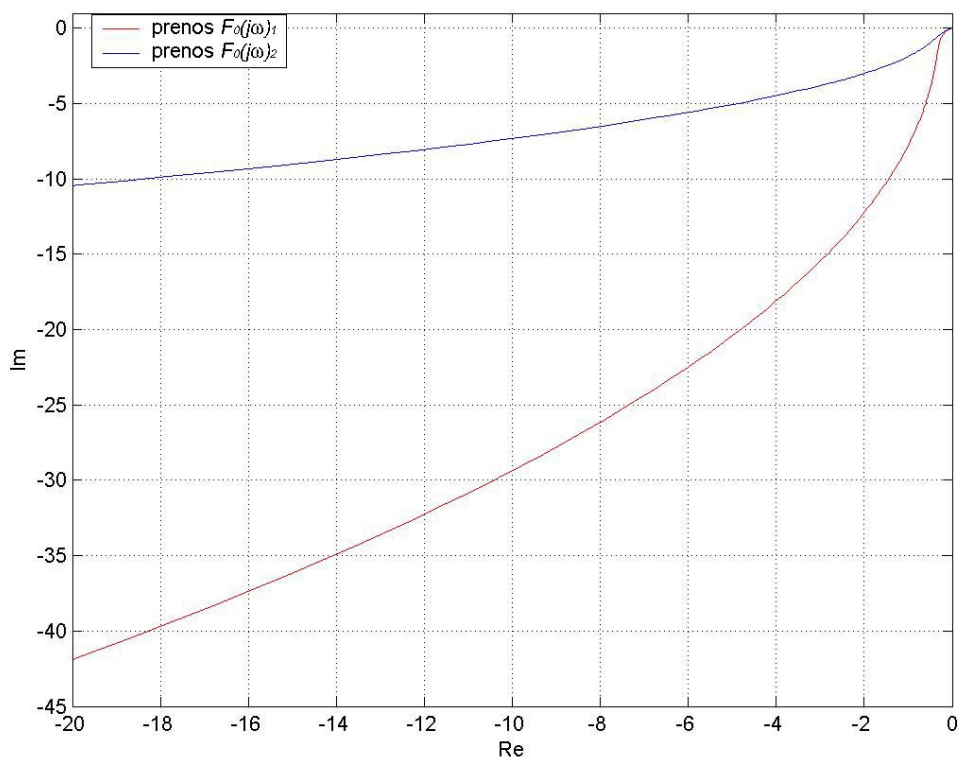
$$F_0(j\omega)_1 = R(j\omega) \cdot F(j\omega) = \frac{0,1594 (j\omega)^2 + 16,08 j\omega + 48,54}{7,598 \cdot 10^{-5} (j\omega)^4 + 0,02329 (j\omega)^3 + 0,7984 (j\omega)^2}$$

pro  $r_0 = 2$  a  $r_1 = 0,4$  lze psát

$$F_0(j\omega)_2 = R(j\omega) \cdot F(j\omega) = \frac{0,1578 (j\omega)^2 + 14,37 j\omega + 2,868}{7,598 \cdot 10^{-5} (j\omega)^4 + 0,02329 (j\omega)^3 + 0,7984 (j\omega)^2}$$

Přenos  $F(s)$  regulovaného systému byl zjištěn pomocí Masonova vzorce. V Matlabu existuje funkce *linmod*, která zjišťuje z lineárního modelu v Simulinku výsledný přenos

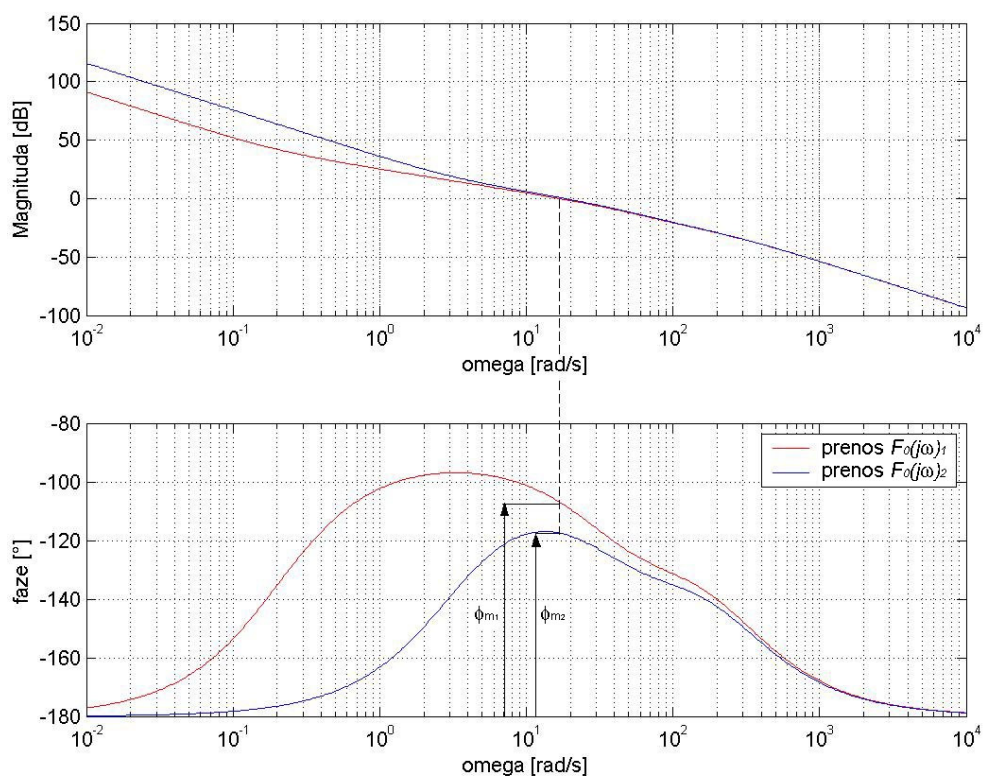
a byla použita pro kontrolu správného řešení. Použití funkce *linmod* spolu s uvedenými průběhy (graf 5.2, 5.3), které jsou zde uvedeny jsou na CD v adresáři *Stabilita/linmod\_srovnani.m*.



Graf 5.2: Amplitudo-fázové kmitočtové charakteristiky  $F_0(j\omega)$

Frekvenční charakteristiky rozpojeného obvodu  $F_0(j\omega)$  v komplexní rovině (graf 5.2) prochází vlevo od kritického bodu  $[-1, 0]$  a proto jsou uzavřené regulační obvody stabilní.

Z logaritmických amplitudových a fázových charakteristik otevřených obvodů v grafu 5.3 jsou názorně vidět fázové bezpečnosti  $\Phi_{m1}=73^\circ$  a  $\Phi_{m2}=62^\circ$ . Amplitudová bezpečnost je u těchto RO nekonečně velká, protože fáze obvodu nepřekročí hodnotu  $180^\circ$ .



Graf 5.3: Logaritmicko-amplitudové a fázové charakteristiky

## 6 Charakteristika řízeného pohonu SIMOREG firmy Siemens.

Stejnoseměrný pohon se skládá ze stejnosměrného elektromotoru a vhodné řídicí jednotky SIMOREG. Jednotka ve své výkonové sekci obsahuje řízené usměrňovače, konkrétně třífázové tyristorové můstky, které zajišťují napájení budícího vinutí a vinutí kotvy elektromotoru. Je-li měnič SIMOREG realizován jako čtyř kvadrantový, pak také umožňuje změnu směru otáčení rotoru. Proud budícím vinutím je udržován na konstantní velikosti. Při požadavku na vyšší rychlost dochází automaticky jeho snižováním k odbuzování statoru.

Řízení tyristorů je realizováno digitálně na bázi 16-ti bitové mikroprocesorové struktury. Ta dále umožňuje realizovat otáčkovou a proudovou zpětnou vazbu, příslušné regulátory a omezovače, stykačové operace, plynulý rozběh a doběh motoru, monitorovací a optimalizační funkce. Hodnoty nastavení jednotlivých parametrů jednotky jsou ukládány do paměti EEPROM. Dále jednotka obsahuje celou řadu volných funkčních bloků (sumátory, PI regulátory, přepínače, analogové a digitální vstupy a výstupy ...), které lze libovolně softwarově propojovat a realizovat tak požadované řídicí struktury.

Žádaná hodnota otáček vstupuje přes blok rozběhu a doběhu (S-křivka) do regulátoru otáček. Ten porovnává skutečné otáčky s požadovanými, které jsou snímány buď tachodynamem, inkrementálním čidlem nebo jako u tohoto měniče bezesnímačovým způsobem pomocí indukovaného napětí. Při diferenci obou signálů regulátor generuje změnu na svém výstupu, který představuje žádanou hodnotu proudu kotvy. Tento signál vstupuje do regulátoru proudu, jehož výstup ovlivňuje úhel sepnutí tyristorů v můstku a tím dochází ke změně výstupního napětí usměrňovače.

Optimální nastavení parametrů jednotlivých regulátorů provádí řídicí jednotka automaticky při uvedení pohonu do provozu pomocí tzv. optimalizačního běhu. Během něj dojde mj. k nastavení regulátoru proudu kotvy, optimálnímu seřízení regulátoru otáček a zaznamenání magnetizační charakteristiky budícího vinutí  $\Phi = f(I_b)$ .

Zadávání všech parametrů jednotky je možné pomocí dvou tlačítek a třímístného sedmi segmentového displeje na předním panelu. Jinou možnost představuje propojení jednotky SIMOREG pomocí rozhraní RS-232 s osobním počítačem vybaveným vhodným softwarem. Katedra KEL má k dispozici vizualizační (monitorovací) program SIMOVIS nebo Drive monitor. S jejich pomocí lze pohodlně zobrazovat celé sady

parametrů najednou, měnit nastavení jednotlivých parametrů, archivovat sady parametrů a zpětně je zavádět do jednotky, monitorovat činnost celého pohonu, atd.

Jednotka SIMOREG obsahuje také jistící a bezpečnostní prvky. Přístup obsluhy k různým sadám parametrů lze programově omezovat podle úrovně pověření pracovníka, aby byla vyloučena možnost náhodné změny v nastavení parametrů, která by mohla vést až k havárii pohonu, popř. celé technologie.

Při výpadku sítě jednotka SIMOREG automaticky vypne pohon. Je-li výpadek kratší než cca 400ms, pak dojde k automatickému restartu jednotky bez přerušení otáčení motoru. Před každým zapnutím jednotka SIMOREG zkontroluje stav jednotlivých tyristorů. SIMOREG umožňuje nastavení maximálních povolených otáček, při jejichž překročení jednotka pohon vypne. Stejně tak dojde k vypnutí pohonu, pokud je hřídel motoru zablokována na dobu delší než dovozuje nastavení. Jednotka také sleduje výkonovou ztrátu na motoru a z její velikosti vypočítává nárůst teplotní křivky motoru. Překročí-li nárůst povolenou hodnotu, pohon se opět automaticky vypne.

Jednotka SIMOREG pomáhá odhalovat případné chyby v nastavení parametrů nebo poruchy silnoproudé části pohonu zobrazením kódu závady na displeji jednotky. Seznam chybových hlášení v manuálu pak umožní chybu identifikovat a odstranit.

## **6.1 Technické specifikace použité jednotky SIMOREG:**

Typ **SIMOREG 6RA2413 – 6DV62 – 0 D420/15Mreq – GeG6V62**

čtyř kvadrantový

Napětí napájecí 420 V (AC)

frekvence 50 až 60 Hz

Kotva:

Napětí jmenovité 420 V (DC)

Proud jmenovitý 15 A

Výkon jmenovitý 6,3 kW

Budící vinutí:

Napětí jmenovité max. 325 V (DC)

Proud jmenovitý 3 A

Výkonová ztráta při jmenovitém proudu

cca 80 W

Krytí

IP00

Hmotnost

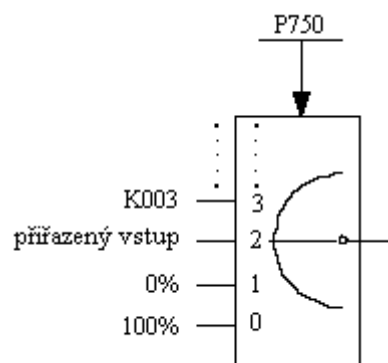
cca 3,5 kg

## 6.2 Změna parametrů jednotky SIMOREG

Detailní popis jednotky SIMOREG výrobce uvádí v uživatelském manuálu [5]. Pro účely této práce bylo nutné podrobně prostudovat logické blokové schéma jednotky. V dalším kroku následovalo seznámení se s filozofií programování jednotky SIMOREG, které spočívá v provádění změn v zapojení jednotky formou nastavování jednotlivých parametrů.

Zjištěné poznatky lze shrnout do následujících bodů:

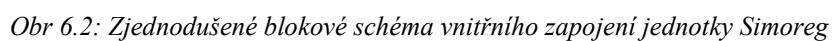
- Schema zapojení jednotky uvedené v [5] popisuje tovární nastavení.
- Každý signál uvedený ve schématu je možné zpřístupnit fyzicky vyvedením na volné svorky (pro případné měření) pomocí softwarového přesměrování. Jednotlivé signály jsou označeny svým číselným kódem s prefixem *Kxxx*. Seznam signálů je uveden v [5] na straně 10/29.
- Chování funkčních bloků lze ovlivňovat změnou nastavení jejich parametrů. Každý parametr má číselné označení s prefixem *Pxxx*. Seznam a popis parametrů je uveden v [5] na straně 9/1 až 9/140.
- Přístupová práva k jednotlivým sadám parametrů mění nastavení parametru *P052* v rozsahu dle pověření pracovníka („provozní obsluha“ až „autorizovaný servisní technik“)
- Jednotlivé funkční bloky lze vyřazovat ze signálové cesty přemostěním nebo prostým odpojením.
- K přemostění slouží funkční bloky označované jako *přepínače* (v originálu *Auswahl-schalter*), viz. obrázek 4. Jedná se v podstatě o multiplexer do něhož vstupují všechny signály.



Obr 6.1: Přepínač

Výběr signálu, který bude přenášen na výstup je dán nastavením parametru přepínače. Číslo *xxx* vložené do parametru odpovídá kódu zvoleného signálu *Kxxx*. Situace na obrázku tedy odpovídá stavu, kdy do parametru *P750* bylo zapsána hodnota 2 a přiřazený vstupní signál je tak zaveden na výstup přepínače.

- Blokové schéma dodávané výrobcem jednotky SIMOREG v sobě zahrnuje všechny bloky, které měnič obsahuje a tím ztrácí na přehlednosti. Pro lepší názornost a přehlednost bylo vypracováno schéma nové (obr. 5.1), které obsahuje části pro tuto práci důležité.



Obr 6.2: Zjednodušené blokové schéma vnitřního zapojení jednotky Simoreg



### 6.3 Nastavení vnitřního regulačního zapojení jednotky pro nastavení parametrů regulátoru otáček

Pro názornost a větší pochopení zde uvedu způsob realizace vnitřního zapojení řídicí jednotky pro měření odezvy stejnosměrného motoru na skokovou změnu požadovaných otáček. Jedná se o praktický příklad, jak se může provádět měření na uvedeném zařízení.

Tovární nastavení jednotky SIMOREG zahrnuje v signálové cestě rozběhovou a doběhovou křivku (S-křivku, v originálu Hochlaufgeber), kterou bylo nutné ze zpětnovazební smyčky vyřadit, aby nezkreslovala měřené odezvy regulačního pochodu. Před vlastním měřením bylo potřeba zpřístupnit signály žádané a skutečné hodnoty otáček, aby bylo možné průběh těchto veličin snímat paměťovým osciloskopem. Všechny signály a parametry, které budou v průběhu postupu zmiňovány, lze najít na zjednodušeném schématu jednotky SIMOREG (viz. obr.5.1) nebo přímo v [5].

#### 6.3.1 Nastavení vnitřní struktury jednotky SIMOREG

Na svorky *XA18* a *XA19* (analogové volitelné výstupy) se přesměruje veličina *K192* – žádaná hodnota regulované veličiny (v tomto případě otáčky).

Do parametru *P750* se vloží hodnota *192*.  $P750 = 192.$

Na svorky *XA14* a *XA15* (analogové volitelné výstupy) se zpřístupní signál *K165* – skutečná hodnota regulované veličiny.

Do parametru *P740* se vloží hodnota *165*.  $P740 = 165.$

Detailnější popis signálové cesty pro analogové volitelné výstupy lze najít v [5] na str. 10/11.

Dále se vyřadí z regulační smyčky rozběhová a doběhová křivka, aby nedocházelo ke zkreslení odezvy na regulační zásah. Blok S-křivky se vyřadí přemostěním – signál *K192* se přivede do součtového místa za blok S-křivky a výstup bloku S-křivky se odpojí.

Do parametru *P622.00* se vloží hodnota *0*.  $P622.00 = 0.$

Do parametru *P622.01* se vloží hodnota *192*.  $P622.01 = 192.$

Bližší informace jsou opět uvedeny v [5] na str. 10/22.

Požadované změny v nastavení regulátoru otáček se provádí zápisem do parametrů *P225* a *P226*, přičemž význam parametrů je následující:

Proporcionální zesílení *K<sub>p</sub>* : *P225*

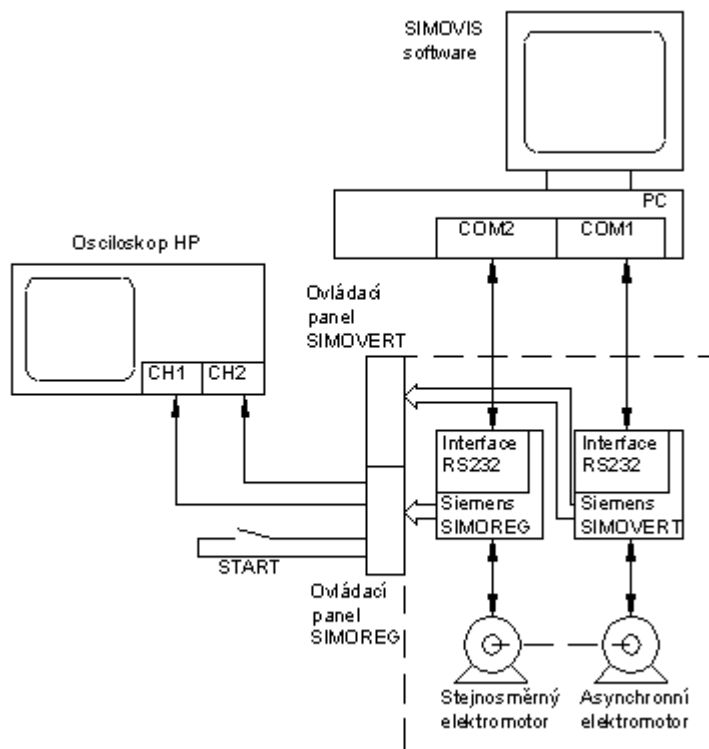
Integrační časová konstanta *T<sub>i</sub>* : *P226*

Detaily jsou opět uvedeny v [5] na str. 10/23.

### 6.3.2 Připojení osciloskopu

Ke svorkám *XA18* a *XA19*, které představují skutečnou hodnotu otáček se připojí sonda prvního kanálu (*XA19* je zemnicí svorka). Druhý kanál se připojí na *XA14* a *XA15*, kde je vyvedena žádaná hodnota otáček (zemnicí svorka *XA15*). Na obrázku 5.2 je uvedeno blokové zapojení měřícího pracoviště.

Skok žádané hodnoty na vstupu realizujeme pomocí signálu odvozeného od přepínače START při nastavených nenulových otáčkách. Aktivace tohoto spínače umožňuje realizovat skokovou změnu otáček z hodnoty nulové na hodnotu nastavenou potenciometrem ručního řízení.



Obr 6.3: Blokové schéma měřícího pracoviště

## **7 Návrh využití karty Humusoft MF604 pro měření a řízení otáček a momentu**

### **7.1 Technické parametry měřící karty**

Společnost Humusoft se specializuje na výrobu měřicích karet pro PC, použitelných jak v laboratorních, tak v průmyslových podmínkách. Všechny karty jsou podporovány produktem Extended Real Time Toolbox pro MATLAB®. Spolu s tímto programovým balíkem tvoří integrované a snadno použitelné prostředí pro sběr dat.

Základní informace potřebné pro práci s kartou, více [11].

#### **Analogové vstupy**

Kanály:	8 single-ended
A/D převodník:	12-bitový, doba převodu 10 ns.
Vstupní rozsahy:	$\pm 10$ V
Spouštění:	programově
Ochrana vstupů:	max. $\pm 16$ V trvale

#### **Analogové výstupy**

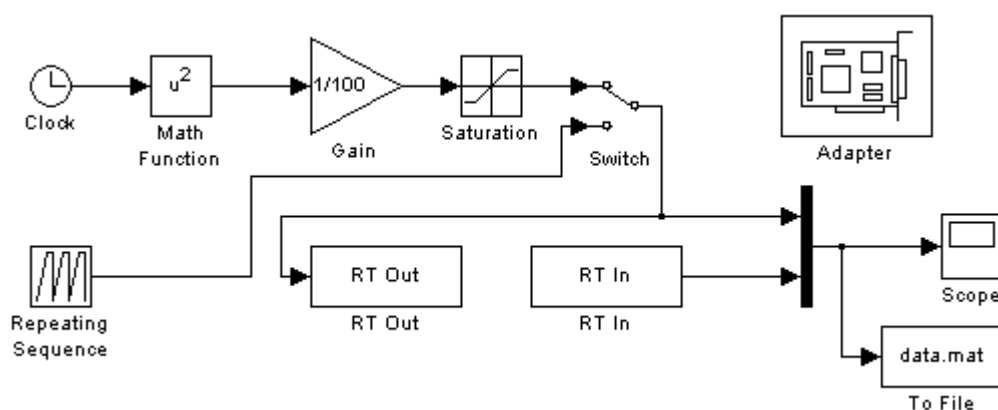
Kanály:	4 kanály
D/A převodník:	12-bitový
Výstupní rozsah:	$\pm 10$ V, $\pm 5$ V, 0–10 V, 0–5 V
Výstupní proud:	10 mA max.

#### **Všeobecné údaje**

Odběr proudu:	50 mA při 12 V
pracovní teplota:	0 – 50 °C
Přerušení:	IRQ 2, 3, 5, 10, 11, 12, 15

## 7.2 Podpora v Matlab® Simulink™

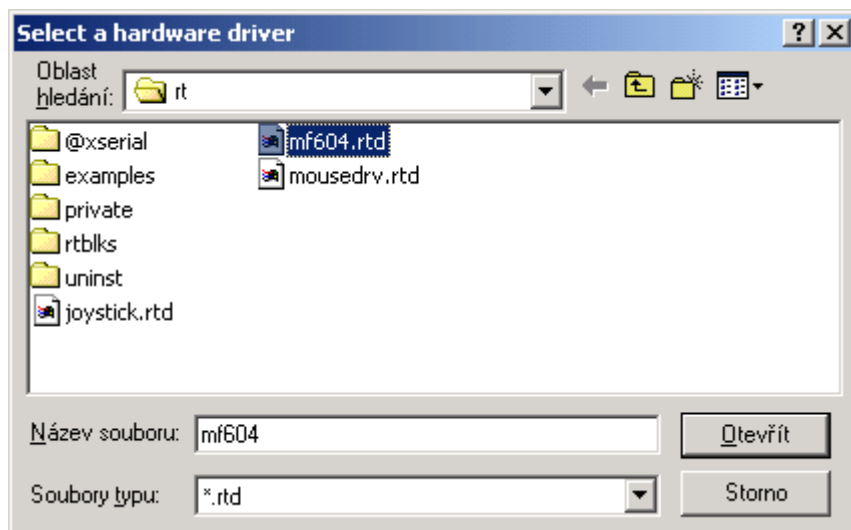
Na obr.6.1 je blokové schéma programu umožňující měření a řízení zobrazení průběhu měřených veličin do grafu a přímé ovládání akčních členů (otáčky, moment atd.). Program na obr.6.1 umožňuje řídit vstupní veličinu  $u$  v celém rozsahu  $u = (0..1)$ , přičemž zde je ukázka volby mezi parabolickou funkcí omezenou blokem saturace a časem simulace a nebo možnosti libovolné sekvence vstupního signálu. Spolu se vstupní veličinou  $u$  je do grafu (zároveň do souboru) načtena měřená výstupní veličina v číselném tvaru.



Obr 7.1: Technika ovládání vstupů a výstupů

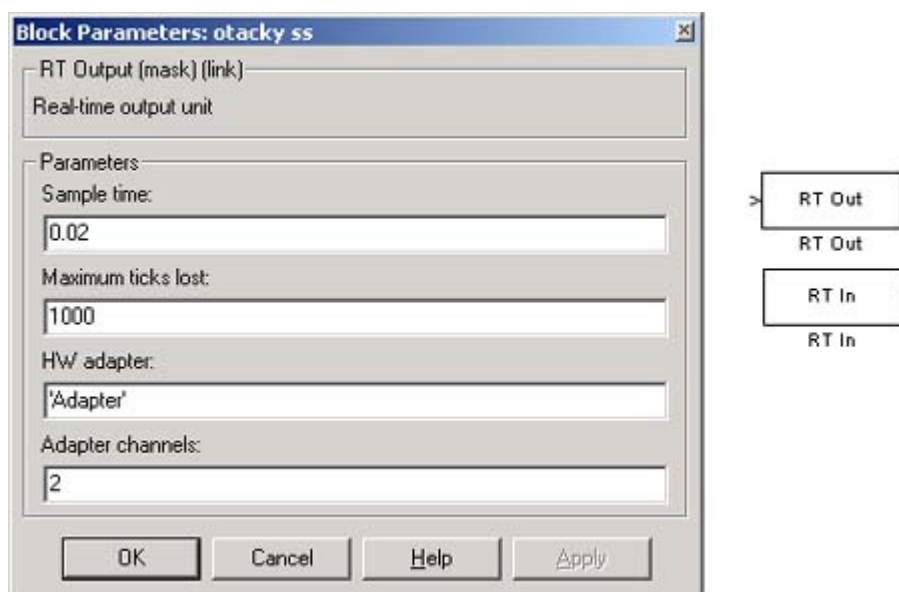
Blok Adapter slouží ke konfiguraci měřicí karty. Musí být obsažen v každém programu používajícím měřicí kartu. Při umístění na plochu vytvářeného programu je tento blok nenakonfigurovaný a je zobrazen červenou barvou. Po dvojkliku na tento blok se objeví zadání souboru s driverem, je nutné vybrat správný soubor podle typu použité karty, v tomto případě je to soubor mf604.rtd, obr.6.2.

Následuje zadání parametrů měřicí karty, jež je nutné ponechat beze změn a pouze potvrdit tlačítkem OK. Proběhne-li konfigurace úspěšně, blok Adapter zčerná.



Obr 7.2: Nastavení bloku Adapter

K ovládání vstupů a výstupů karty slouží dvojice bloků *RT Out* a *RT In* viz. obr.6.3.



Obr 7.3: Ovládání vstupů a výstupů multifunkční karty

Proměnná *Sample time* určuje periodu posílání hodnot na výstup karty v sekundách. Pro toto měření byla hodnota nastavena alespoň na 0,02.

Proměnná *Maximum ticks lost* udává počet neposlaných dat v důsledku zaneprázdnění počítače jinou činností než dojde k chybě a zastavení programu, mnohdy i k restartu celého systému. Doporučuji zvětšit hodnotu *Maximum ticks lost* na 1000 – 10000, aby nedocházelo k zastavení programu při zásazích uživatele programu, které jsou zpravidla

náročné na výpočtový čas a tyto zásahy omezit na minimum. Je třeba mít na paměti, že MS Windows není systém uzpůsoben pro řízení v reálném čase a akce jako posouvání oken grafu nebo rychlá změna kurzoru myši zaneprázdní procesor natolik, že potom není schopen zaručit posílání dat v krátkých pevně daných časových intervalech.

Parametr *HW adapter* obsahuje název bloku *Adapter*, kterému přísluší. V případě většího počtu měřících karet v PC, je možno je používat současně tak, že každá karta má svůj blok *Adapter*.

Parametr *Adapter channels* udává číslo kanálu, na kterém dochází k měření nebo řízení.

Parametry nastavení vstupů jsou obdobou výstupních:

*Sample time* je nastavení periody vzorkování, doporučená hodnota alespoň 0,02.

*Maximum ticks lost*, počet povolených ztracených vzorků, doporučená hodnota 1000.

*HW adapter*, přiřazení bloku *Adapter*. *Adapter channels*, výběr vstupních kanálů.

### **7.3 Experimentální měření a řízení pomocí multifunkční karty**

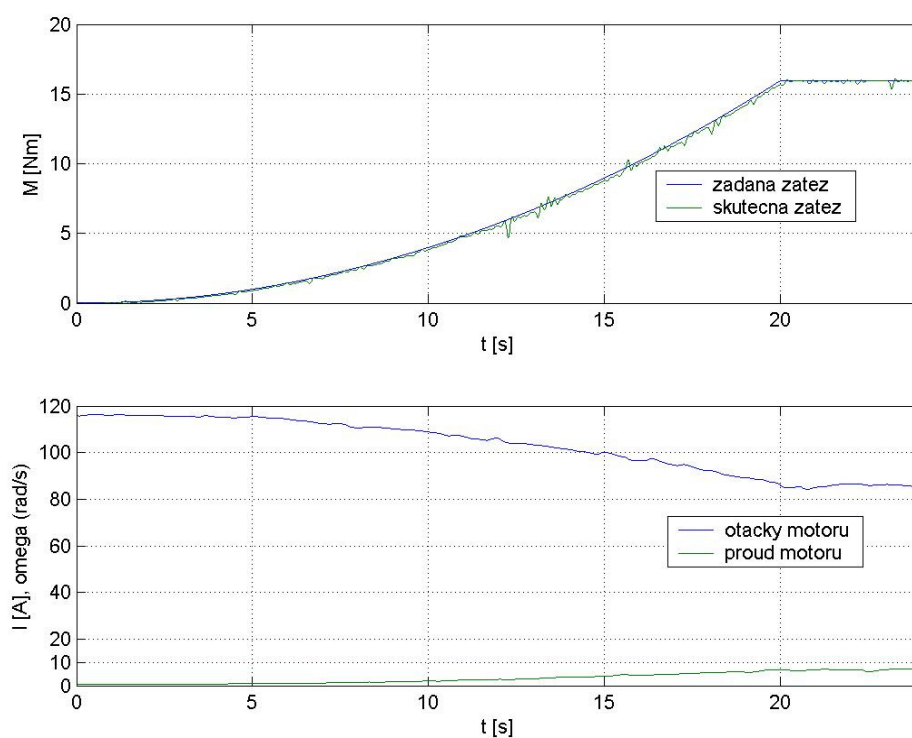
Karta byla využita jak pro měření pomocí analogových vstupů, tak i pro řízení přes analogové výstupy. Použitý řízený měnič SIMOREG nedisponuje možností vizualizace měřených průběhů softwarovými balíky od společnosti Siemens, proto je velice vhodné použít Real Time Toolbox v Simulinku. Součástí měřicí karty jsou ovladače pro měřicí kartu, které se zavedou do Simulinku.

Další bezesporu kladný přínos je ten, že lze přivádět na analogové vstupy měniče signál, který může být popsán matematickou funkcí nebo přímo signál, který byl naměřen jako výstup z reálného systému. Umožňuje tedy zavést signál, který byl zaznamenán pomocí měření (př.: na textilním stroji) a pomocí simulinku a multifunkční karty tento signál můžeme zavést na vstup asynchronního motoru, který tvoří zátěž pro stejnosměrný motor. Takto lze simulovat reálný systém jako je například momentové zatížení textilního stroje, působící na hnací pohon.

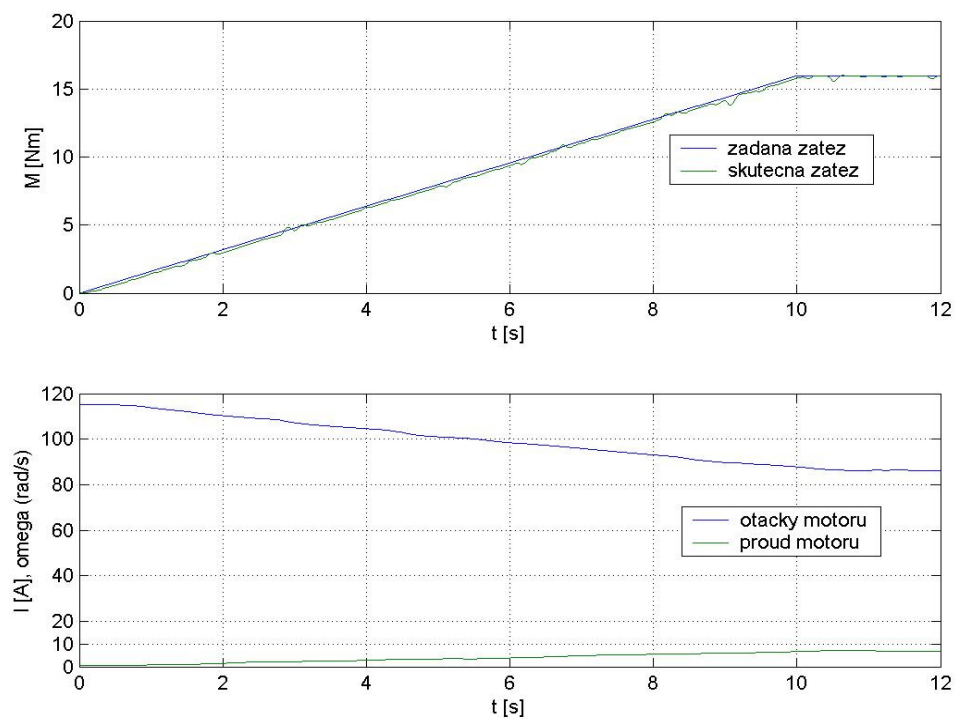
#### **7.3.1 Ukázka možností karty**

Bylo provedeno měření při zatížení stejnosměrného motoru asynchronním motorem. Měnič SIMOVERT byl zapojen v momentovém řízení a požadovaný moment byl nasměrován z měřicí karty. Z analogových výstupů měniče SIMOREG se měřili skutečné otáčky a kotevní proud při řízené změně momentu. Měření bylo uskutečněno pro více druhů signálu s proměnnou dobou měření.

Následující grafy ukazují možnosti řízení a měření pomocí karty Humusoft.



Graf 7.1: Vliv parabolické zátěže na ss motor



Graf 7.2: Vliv lineární řízené zátěže na ss motor

## 8 Verifikace simulačního modelu s naměřenými průběhy výstupních veličin

### 8.1 Porovnání naměřených a simulovaných přechodových charakteristik

Pro ověření věrohodnosti navrženého modelu stejnosměrného motoru bylo nutné naměřit přechodové charakteristiky řízeného pohonu (motor + SIMOREG + zátěž) při rozličných nastaveních parametrů regulátoru otáček. Měření pouze na stejnosměrném elektromotoru nebylo technicky možné.

Pasivní zátěž představoval připojený asynchronní elektromotor bez napájení. Moment asynchronního motoru byl vzat z katalogových údajů a z měřeného momentu celého pohonu byl zpětně dopočítán moment setrvačnosti stejnosměrného motoru.

Celkem bylo naměřeno 12 přechodových charakteristik pro různá nastavení regulátoru. Proporcionální zesílení regulátoru otáček se pohybovalo v rozmezí 15 až 0,5 [-]. Integrační časová konstanta byla v intervalu 10 až 0,011 [s]. Viz. Dále jsou uvedeny některé naměřené odezvy. Úplný přehled naměřených veličin je uveden v adresáři *Měření \_změna \_PI* na CD.

Simulované průběhy vznikly na modelu, který je popsán v kapitole 4. PI regulátory jsou zapsány ve tvaru

$$R_{(s)} = K_p \cdot \left(1 + \frac{1}{T_i \cdot s}\right) \quad (7.1)$$

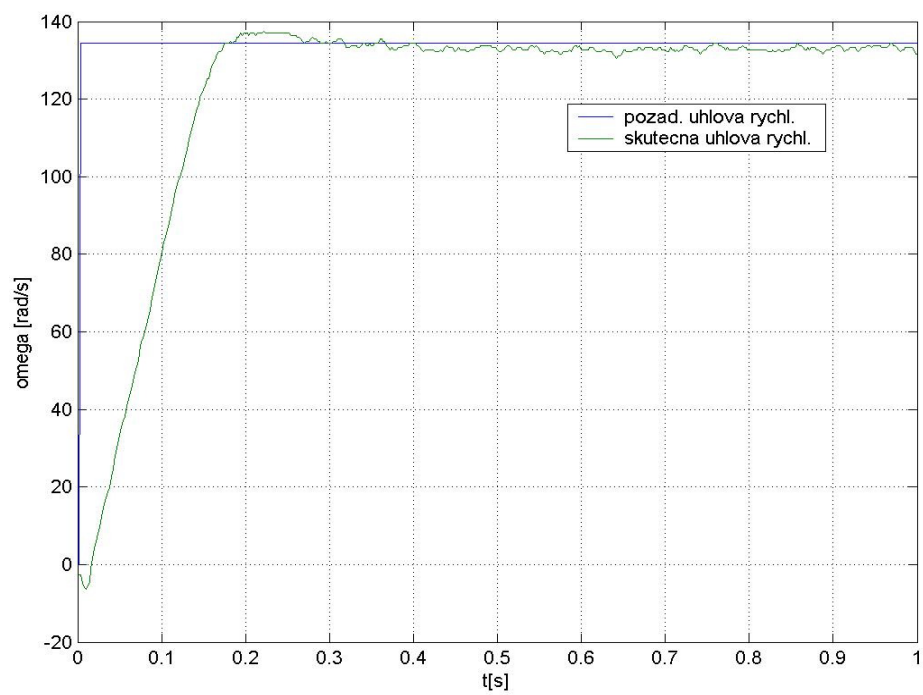
Parametry PI regulátoru proudu kotvy odpovídá aktuálnímu nastavení jednotky SIMOREG.

Proporcionální zesílení regulátoru  $K_p = 0,32$  (parametr P155).

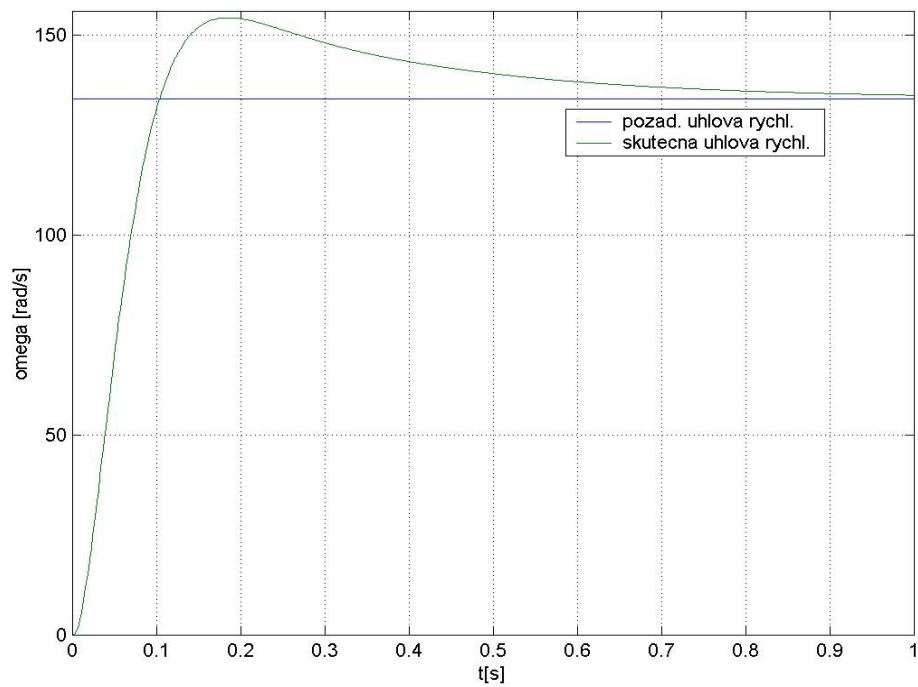
Integrační časová konstanta regulátoru  $T_i = 0,011$  (parametr P156).

Následující dvojice obrázků uvádějí vždy naměřenou a simulovanou odezvu regulované veličiny  $y(t)$  stejnosměrného pohonu na skokovou změnu žádané hodnoty  $\omega(t)$ , spolu s hodnotami parametrů regulátoru otáček pro které se měření resp. simulace uskutečnila. Regulovanou veličinu zde představují otáčky. Skok žádané hodnoty odpovídá 100% hodnoty otáček motoru.

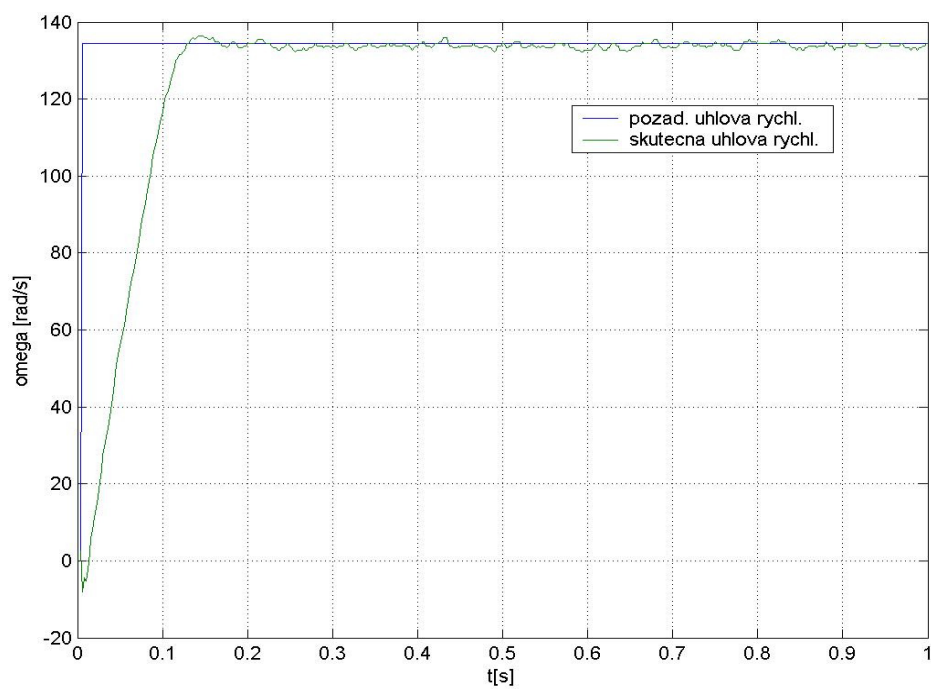




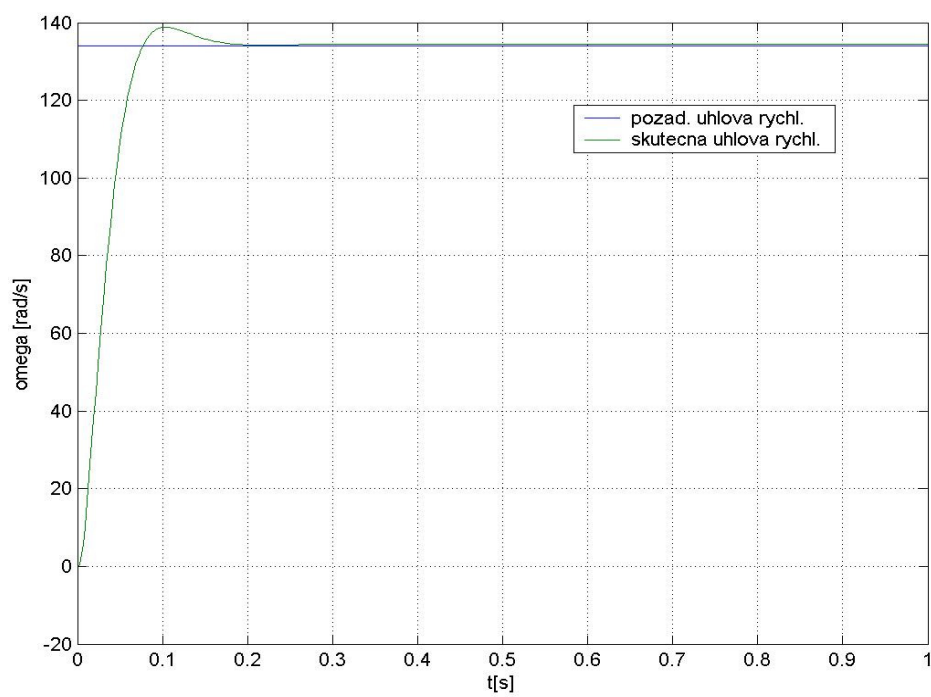
Graf 8.1: Naměřená přechodová charakteristika pro  $K_p = 2,02$  a  $T_i = 0,321$



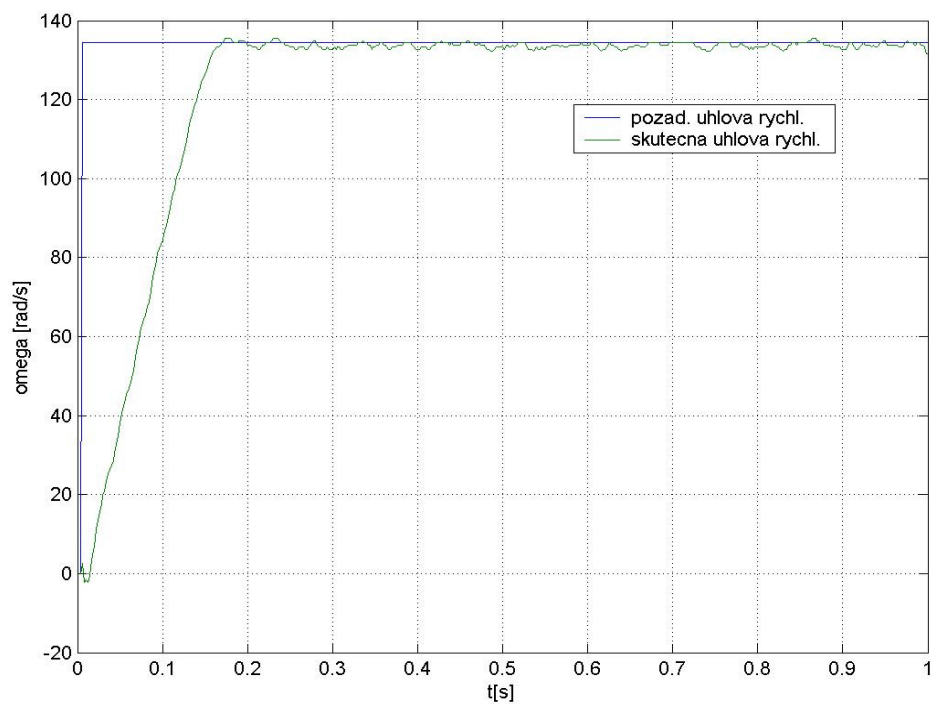
Graf 8.2: Simulovaná přechodová charakteristika pro  $K_p = 2,02$  a  $T_i = 0,321$



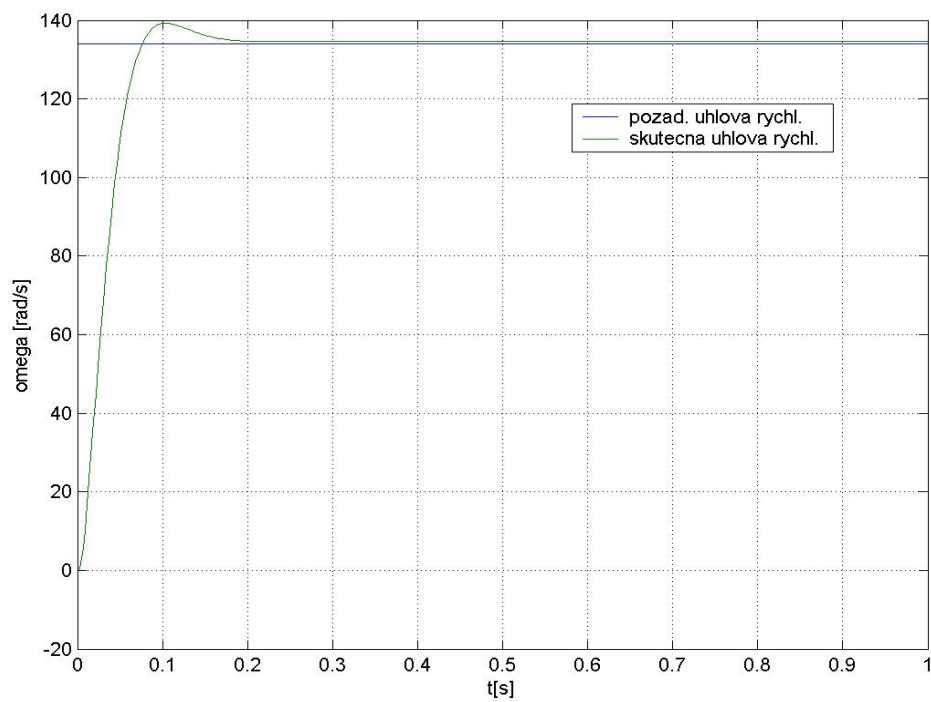
Graf 8.3: Naměřená přechodová charakteristika pro  $K_p = 4$  a  $T_i = 10$



Graf 8.4: Simulovaná přechodová charakteristika pro  $K_p = 4$  a  $T_i = 10$



Graf 8.5: Naměřená přechodová charakteristika pro  $K_p = 4$  a  $T_i = 5$



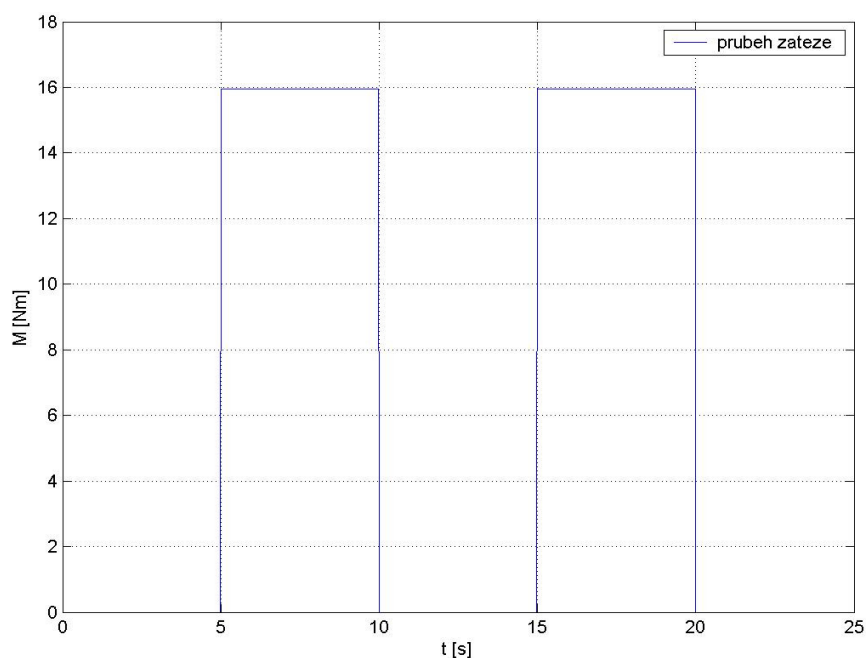
Graf 8.6: Simulovaná přechodová charakteristika pro  $K_p = 4$  a  $T_i = 5$

## 8.2 Porovnání naměřených a simulovaných průběhů při řízené zátěži

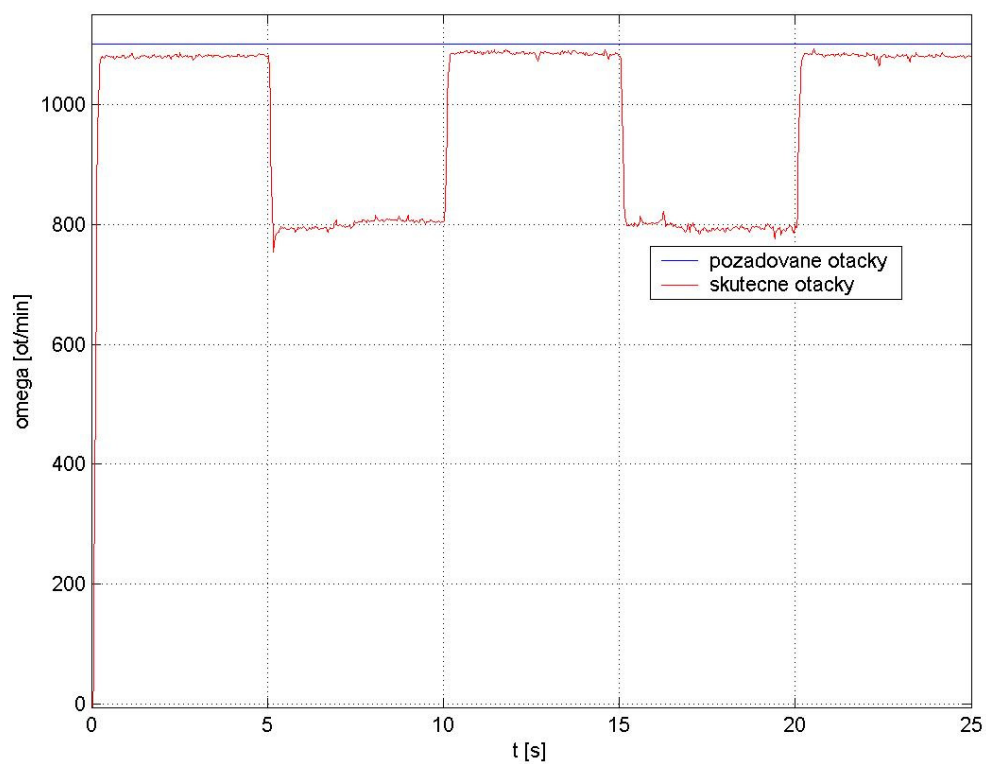
Model byl nastaven tak, aby co možná nejvíce odpovídaly všechny parametry reálnému pohonu. Otáčkový PI regulátor (parametr  $P225$ ) měl proporcionální složku nastavenou na hodnotu  $K_p = 2$  a (parametr  $P226$ ) integrační složku  $T_i = 5$ . Nastavení proudového regulátoru bylo stejné jako při měření přechodových charakteristik. U modelu byly nastaveny PI regulátory stejně jako v regulační struktuře Simoreg.

Bylo odměřeno více závislostí pro různé výstupní otáčky a proměnnou časovou dobu. Zde je uveden případ, pro jmenovité otáčky a skokovou zátěž, která při skoku znamenala jmenovitou zátěž pro stejnosměrný motor. Ostatní naměřené průběhy jsou zpracovány na příloženém CD v adresáři *Měření\_se\_zátěží*.

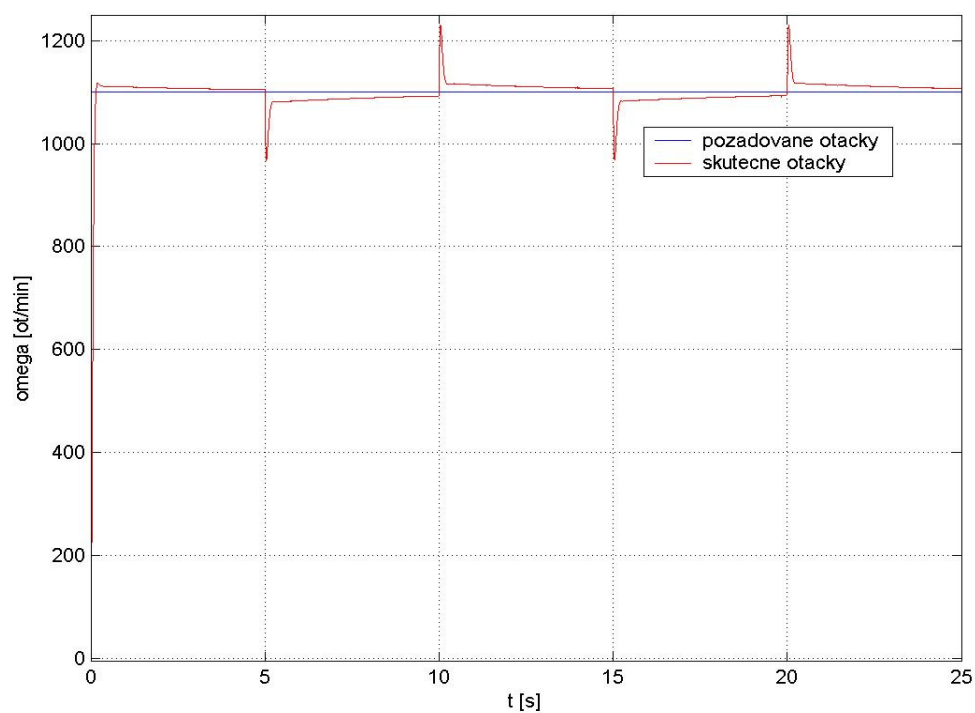
Měření probíhalo pomocí měřicí karty, která je popsána v kapitole 6. Při měření byl nejprve stejnosměrný motor roztočen na jmenovité otáčky a pak došlo k připojení zátěže skokového charakteru graf 8.7. Grafy 8.8 – 8.9 porovnávají naměřené a simulované otáčky ss motoru při skokové změně zátěžného momentu. Další dva průběhy (graf 8.10) srovnávají průběhy proudu kotvy.



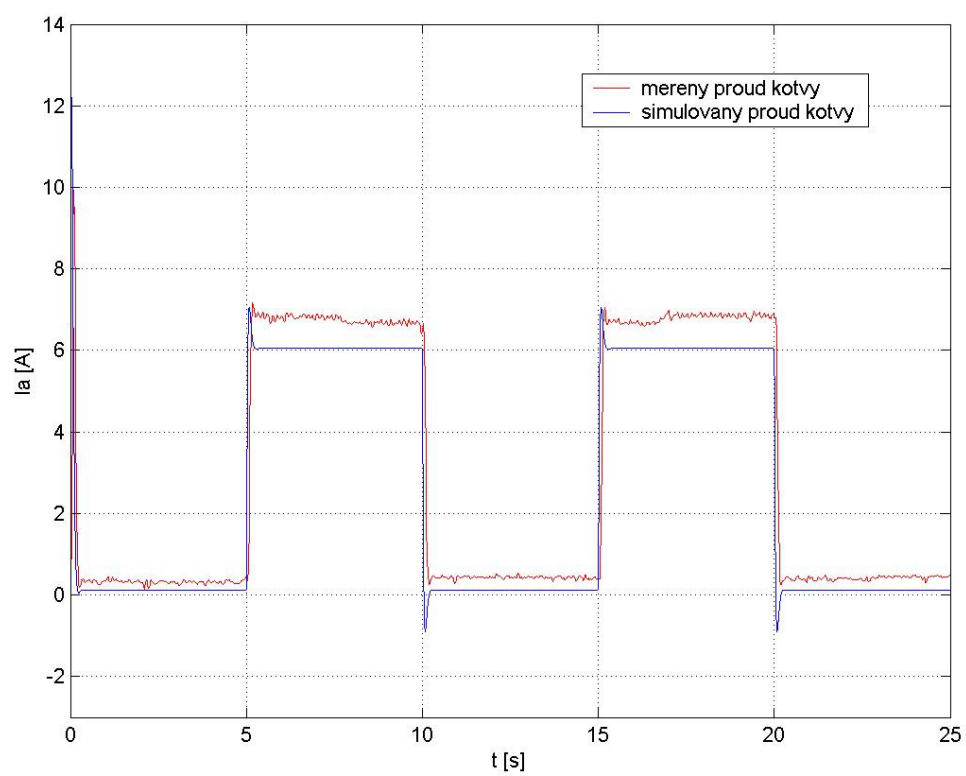
Graf 8.7: Skokový průběh zátěže pro stejnosměrný motor



Graf 8.8: Naměřený požadovaný a skutečný průběh otáček



Graf 8.9: Simulovaný požadovaný a skutečný průběh otáček



Graf 8.10: Naměřený a simulovaný průběh proudu kotvy

### 8.3 Zhodnocení dosažených výsledků

Jedním ze stanovených cílů diplomové práce byla verifikace dosažených výsledků měření na reálném pohonu a simulací na modelu.

V prvním měření kdy byly realizovány skokové změny vstupních otáček pro optimální nastavení otáčkového regulátoru je z porovnání grafu 8.1 a 8.2 vidět srovnání měřené a simulované charakteristiky, doba náběhu je srovnatelná, ale u simulovaného průběhu dochází k většímu překmitu a má delší čas ustálení. Podstatně lépe lze srovnávat další dva průběhy (graf 8.3-8.4), kde doba náběhu u naměřené charakteristiky je 0,12s a u modelu je 0,07s, překmit u měřeného průběhu je přibližně  $\approx 2\%$ . Což odpovídá po přepočtu nepřesnosti 26 ot./min. U modelu je překmit o málo větší a odpovídá přibližně 48 ot./min. Pro nastavení otáčkového regulátoru  $K_p = 4$  a  $T_i = 5$  (graf 8.5-8.6) jsou výsledky obdobné jako u druhého srovnání.

Při řízené změně momentu (skokové průběhy) v dalším srovnání pro jmenovité otáčky je z grafu 8.8 patrné, že regulační struktura měniče Simoregu nedokázala reagovat na velikost zátěžného momentu a došlo k výraznému poklesu otáček. Mezi hlavní příčiny bezesporu patří to, že řízený usměrňovač je dosti měkký zdroj napětí. Další důvod poklesu otáček by mohl být způsoben tím, že motor nemá otáčkové čidlo a proto nemá přesnou informaci o poklesu otáček motoru. Měnič si hodnotu otáček dopočítává z indukovaného napětí a vnitřního magnetického toku. Model se ustálí na požadovaných otáčkách, ale vznikají při přechodu špičky, ty by se daly eliminovat snížením velikosti proporcionálním zesílením. Průběh 8.10 zobrazuje průběh proudu kotvy  $I_a$  měřený a simulovaný. Z grafu je patrné, že velikosti obou proudů se dosti shodují, jedná se o 10% rozdíl hodnot proudů při zatížení a při běhu naprázdno je hodnota ustáleného, měřeného proudu kotvy o 0,2A vyšší.

Z uvedených porovnaných průběhů lze usoudit, že dynamika měřených a simulovaných průběhů je dosti shodná, ale dochází k jistým nepřesnostem v ustálených hodnotách. K větší schodě by bylo zapotřebí více rozpracovat model řízeného usměrňovače a doplnit o jednotlivá omezení (proud, otáčky).

## 9 Závěr

V rámci diplomové práce byly odměřeny jednotlivé parametry motoru, které tvoří základ pro další činnost. Byl navržen a realizován model stejnosměrného motoru s proudovou a otáčkovou zpětnou vazbou. Zároveň byla namodelována pružná spojka, která je mezi stejnosměrným a asynchronním motorem.

Model motoru s otáčkovou a proudovou zpětnou vazbou a pružná spojka byly vytvořeny na základě obecných diferenciálních rovnic popsanych v teoretické části práce. Jednotlivé části modelu (blok stejnosměrného motoru, pružná spojka ) lze využít i samostatně.

Na simulačním modelu byla ověřena stabilita systému pro různé provozní stavy otáčkového regulátoru.

Získané výsledky ze simulací lze porovnávat i s hodnotami, které byly získány měřením. Je nutno si ale přiznat, že vytvořit model naprosto odpovídající reálnému pohonu s postihnutím veškerých jevů je skoro nemožné. Snahou bylo vytvořit, za předpokladu některých zjednodušení, co nejvěrnější model tohoto pohonu.

K dispozici byla multifunkční karta Humusoft, a tak bylo navrženo pomocí Real-Time Toolboxu v Matlabu měření a řízení otáček a momentu.

Sestavený model lze dále doplňovat a zlepšovat. Multifunkční karta, bude dále využita pro simulaci rychle a dynamicky se měnícího momentového zatížení, které se objevuje u textilních pohonů.



## 10 Literatura

- [1] Caha, Z.- Černý, M.: Elektrické pohony, SNTL Praha, 1990
- [2] Uhlíř, I.: Elektrotechnika, skripta ČVUT Praha, 1997
- [3] Vittek, J.: Matlab pre elektrické pohony, učební text ŽU, 1997
- [4] Kalaš, D., Jucha, I.: Matlab.Simulink a Control System Toolbox, STU Bratislava, 1996
- [5] Siemens: SIMOREG K 6RA24 Ergänzung zu Betriebsanleitung, uživatelská příručka
- [6] Modrlák, O.- Kyrál, A.: Úvod do identifikace, učební text, TU Liberec
- [7] <http://www.fs.vsb.cz/books/Analyza/prvni.html>
- [8] Pavelka, J.- Čeřovský, Z.- Javůrek, J.: Elektrické pohony, ČVUT, 2001
- [9] Žabka, M.: Návrh parametrů asynchronního motoru a stejnosměrného motoru s cizím buzením, ročníkový projekt, 2000
- [10] Javůrek, J.: Regulace moderních elektrických pohonů, GRADA, 2003
- [11] <http://www.humusoft.cz/datacq/mf604cz.htm>
- [12] Siemens: SIMOVERT 6SE70, uživatelská příručka
- [13] <http://www.fs.vsb.cz/books/Analyza/>
- [14] <http://www.fme.vutbr.cz/opory/pdf/ZakladyAutomatizace.pdf>
- [15] Modrlák, O.: Analýza dynamických systémů, Studijní materiály, TU Liberec
- [16] Pavelka, J.- Čeřovský, Z.: Výkonová elektronika, ČVUT, 2002

## 11 Přílohy

### A Výpis zdrojového textu souboru identifikace.m a crit.m

```
%Identifikace systemu 1. radu metodou nejmensich ctvercu
%          I0
%   S(s) = -----
%          tau.s+1
clc;clear all;close all;
global t u i
load data_kotvy
t=PRINT_03(:,1);i=PRINT_03(:,2);
i=i-mean(i(1:10));
i(1930:2000)=[];t(1930:2000)=[];
figure;plot(t,i);grid on;
i = i(146:length(i));
t = t(146:length(t));
t = t - t(1);
u = ones(size(i));
I0=1.48;tau=1;
s=tf(I0,[tau 1]);
x=[I0 tau];
crit(x)
OPTIONS=optimset('LargeScale','off','MaxIter',200,'Display','iter');
%---posilam funkci hodnotu, která se ma minimalizovat---
x = fminsearch('crit',x,OPTIONS);
%OPTIONS(2)=1e-3;%OPTIONS(3)=1e-3;%OPTIONS(14)=200;
disp('optimalizovany vektor x');x
disp('Hodnota kriteria J')
crit(x);I0=x(1);tau=x(2);
s=tf(I0,[tau 1])
[ii,ti]=lsim(s,u,t);
figure;plot(t,i,ti,ii);grid on;
Title('Identifikace i=f(t)');
legend('namerena data','identifikovana data');
Xlabel('t [s]');Ylabel('I [A]')

function f=crit(x)
global t i u
I0=x(1);tau=x(2);
if tau <= 0,
    f = inf;
else
    s=tf(I0,[tau 1]);
    [ii,ti]=lsim(s,u,t);
    f=sum((i-ii).*(i-ii));
end
```

## B Naměřená data pro zatěžovací charakteristiky

n [ot/min]	Ia [A]	I <sub>sim</sub> [A]	r007	Ms [Nm]
200	0.44	0.42	0	0
154	1.51	1.33	0.2	3.19
94	2.88	2.8	0.4	6.38
48	3.7	3.76	0.6	9.57
0	4.66	4.68	0.8	12.77
-50	5.67	5.55	1	15.96
400	0.49	0.46	0	0
350	1.7	1.44	0.2	3.19
289	2.9	2.87	0.4	6.38
232	4.05	3.85	0.6	9.57
171	5.25	5.04	0.8	12.77
94	6.68	6.65	1	15.96
600	0.48	0.44	0	0
545	1.74	1.68	0.2	3.19
481	2.96	2.8	0.4	6.38
419	4.21	4.06	0.6	9.57
346	5.53	5.25	0.8	12.77
275	6.78	6.51	1	15.96
800	0.45	0.49	0	0
734	1.75	1.68	0.2	3.19
669	3.02	2.87	0.4	6.38
606	4.3	4.27	0.6	9.57
539	5.6	5.46	0.8	12.77
466	7.03	6.98	1	15.96
1000	0.53	0.49	0	0
933	1.86	1.61	0.2	3.19
868	3.06	2.87	0.4	6.38
800	4.36	4.13	0.6	9.57
733	5.68	5.6	0.8	12.77
655	7.13	6.84	1	15.96

kde:

n... otáčky motoru

Ia... proud kotvy naměřený na ampérmetru

I<sub>sim</sub>... proud odečtený ze Simoregu

r007... vizualizační parametr Simovertu

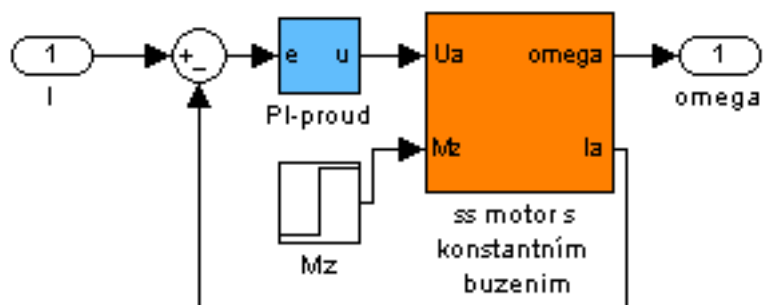
Ms... moment na hřídeli ss motoru

## C Výpis souboru parametry.m

%parametry stejnosmerneho motoru s cizim buzenim %%%%%%%%%%

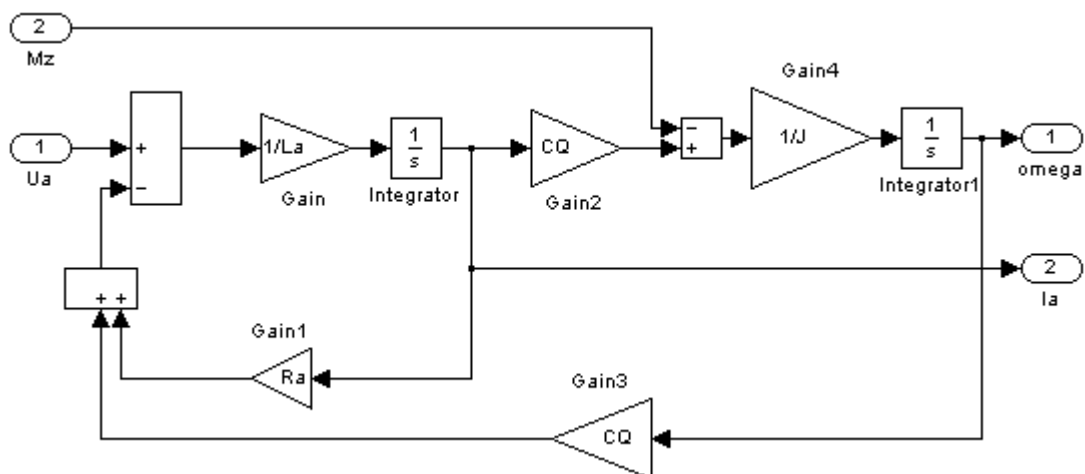
La = 0.041	%[H]	indukcnost kotvy
Ra = 12.33	%[ohm]	odpor kotvy
Lb = 0.220	%[H]	indukcnost buzeni
Rb = 135.63	%[ohm]	odpor buzeni
B = 0.0031275	%[W*s^2]	viskozni treni
CQ = 3.02	%[V*s]	konstanta motoru
J = 0.0164	%[kg*m^2]	moment setrvacnosti ss motoru
Jp=0.0063	%[kg*m^2]	moment setrvacnosti asyn. motoru
%J = 0.0227	%[kg*m^2]	
Css=37.4595	%[-]	konstrukcni konstanta ss motoru

## D Vnitřní struktura regulačního zapojení pro určování stability



Obr D.1: Regulovaný systém

## E



Obr D.2: Stejnosměrný motor s konstantním buzením